



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

CAMALEÓN, GENERADOR ADAPTATIVO DE COLORES MEDIANTE LEDS DE ALTA POTENCIA

AUTOR: ROCÍO GÁLVEZ CASTILLO

DIRECTOR: JUAN VÁZQUEZ MARTÍN

CODIRECTOR: RAFAEL REINA ACEDO

SEPTIEMBRE 2009

AGRADECIMIENTOS

Cuando miro hacia atrás y pienso en estos tres últimos años me sorprende no acordarme primero de aquellos momentos duros que me hacían plantearme por qué razón había escogido esta carrera, como los días antes de entregar una práctica imposible o la tensión de los exámenes.

En lo primero que pienso es en todas las personas que estaban conmigo en esos momentos y que gracias a ellos conseguí seguir adelante. Por eso me gustaría poder agradecerles su apoyo durante estos años.

En primer lugar me gustaría mencionar a Tomás, mi profesor de tecnología del instituto, ya que gracias a sus clases y al entusiasmo que tenía enseñando escogí esta carrera. Seguramente que sin “NEPO”, el primer robot que diseñé gracias a Tomás, nunca hubiese sabido que me gustaba tanto la electrónica.

También quería dar las gracias a mi familia, especialmente a mis padres y hermanas. Ellos siempre han creído en mí, sobre todo en estos últimos días en los que parecía que el proyecto no quería funcionar. Sin su apoyo nunca hubiera conseguido llegar hasta aquí.

No puedo olvidarme de mis compañeros de universidad que han pasado conmigo momentos duros pero sobretodo momentos buenos. Gracias a ellos recordaré mi paso por la Universidad siempre con cariño, ya que fue allí donde conocí a todos. Me gustaría darles las gracias, pero en especial a Gonzalo, que ha sido mi apoyo día tras día. Gracias por tu paciencia, por tener siempre las palabras adecuadas y sobretodo por estar conmigo pasase lo que pasase. A Noemí, que ha estado a mi lado desde el primer día hasta hoy y que espero que siga siendo así durante mucho tiempo. A Víctor, que me ha hecho pasar muchos buenos momentos y siempre ha sabido sacarme una sonrisa. A Miguel por ser un auténtico papá en la Universidad. A Pablo, Antonio, Javier, Daniel y David por aparecer en los momentos que les necesitaba. A todos gracias.

Quisiera también agradecerles a mis amigas su comprensión durante estos años. Siempre me han animado a seguir estudiando y para mí ha sido muy importante. Especialmente a Raquel que me ayudó a conseguir las muestras de color para el proyecto y que en este último año me ha apoyado tanto. También quisiera agradecerle a Francisco haber puesto color al proyecto prestando su talento para diseñar el logo.

Finalmente, darles las gracias a mis tutores Juan y Rafael por ofrecerme este fantástico proyecto y haberme ayudado cuando han surgido dificultades.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN DEL PROYECTO.....	7
CAPÍTULO 1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	8
1. Motivación del proyecto.	9
2. Organización del documento.	9
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN.....	11
1. Introducción a la colorimetría.....	11
1.1. Tinte, saturación y luminancia.	13
1.2. Leyes de la colorimetría.....	14
1.3. Carta xy CIE.....	15
2. Fuentes de luz.....	17
3. Receptores.....	24
3.1. Sensores de luz.	24
4. Fibra óptica.....	30
Se puede destacar diferentes ventajas de usar este sistema de transmisión:	31
5. Microprocesador ARM 7.....	35
4.1. Características más relevantes del ARM7.....	36
CAPÍTULO 3. SISTEMA PROPUESTO.....	40
CAPÍTULO 4. DISEÑO HARDWARE.....	45
1. Sistema de iluminación o emisor.....	45
1.1. Circuito de control de los LEDs.	45
1.2. Sistema de control del foco.	48
2. Sistema receptor.	48
3. Alimentación del foco.....	50
4. Circuito de alimentación del microprocesador.....	51
5. Circuito de control por interruptores.....	51
6. Relación de los puertos del microprocesador utilizados.	53
CAPÍTULO 5. DISEÑO SOFTWARE.....	54
1. Inicialización del microprocesador.	54
2. Programa principal.....	57
3. Programa de calibración.	58



4.	Programa de demostración “demo” .	61
5.	<i>Programa de generación de la señal PWM.</i>	61
6.	Programa de barrido o “burst” .	63
7.	<i>Programa de interrupción del timer.</i>	65
CAPITULO 6. DISEÑO MECÁNICO.		66
1.	<i>Caja de control.</i>	66
2.	<i>Caja de alimentación del foco.</i>	70
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.		72
1.	<i>Gama de colores reproducible.</i>	72
2.	Alcance.	77
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.		78
BIBLIOGRAFÍA.		80
ANEXO 1. ESTUDIO ECONÓMICO.		82
ANEXO 2. CÓDIGO DEL PROYECTO.		84
ANEXO 3. ESQUEMA ELÉCTRICO DEL PROYECTO.		96



RESUMEN DEL PROYECTO.

Se pretende diseñar un sistema capaz de reproducir colores a través de un foco tricolor RGB. Se pueden diferenciar dos grandes partes del proyecto, una de reconocimiento del color del objeto y otra de la reproducción del mismo.

Para identificar los colores se ilumina el objeto con tres focos de luz: rojo, verde y azul. A continuación, se mide la luz reflejada. De esta forma se consiguen los niveles RGB del color, pero es necesario establecer un sistema de referencia, es decir, un nivel máximo y mínimo de cada color.

Tras un estudio de colorimetría, se definió la luz reflejada por un objeto blanco como el nivel máximo de luz que puede medir el sistema, ya que este color refleja toda la luz. El negro teóricamente no refleja nada, aunque en la realidad existe un “offset”, por lo tanto se considera la medida como el nivel mínimo de luz que puede medir el sistema. Establecido el rango de medidas se puede calcular los niveles RGB de cualquier color.

La luz reflejada se mide por un sensor con salida analógica. Para facilitar el procesado de los datos, estos son convertidos por el A/D de un microprocesador.

Una vez obtenidos los datos, se deben transformar para convertirlos en información útil para el foco y poder reproducir el color. El control del foco funciona por señales PWM, una por cada nivel RGB. Cuanto mayor sea el ciclo de trabajo de la señal los LEDs lucirán con mayor intensidad. Por lo tanto, el ciclo de trabajo debe ser proporcional al nivel medido.

El nivel de blanco corresponde a una señal con ciclo de trabajo del cien por cien, así como el negro del cero por ciento. Para el resto de colores se calculará con una simple regla de proporcionalidad.

El microprocesador se encarga de realizar los cálculos necesarios y de generar las señales PWM que controlan el foco. De esta forma se consigue reproducir el color.

Llegado este punto, cabe preguntarse qué colores es capaz de reproducir el sistema. Para ello se realizará un estudio que consiste en calcular las coordenadas xyz de los colores que emiten los LEDs, tanto del foco como los utilizados para medir la luz reflejada del objeto. Al calcular las coordenadas podemos situarlas en el diagrama cromático. Si unimos estos puntos se forma un triángulo que abarca los colores que puede llegar a imitar el sistema, marcando así las limitaciones del diseño.



CAPÍTULO 1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El camaleón es conocido por su habilidad para cambiar de color según el entorno en el que se encuentre. Su piel imita los colores de lo que esté a su alrededor pasando así desapercibido. En el presente proyecto se propone un sistema de reproducción de colores parecido al utilizado por estos curiosos animales. Se pretende extraer el color de cualquier objeto y reproducirlo a través de un foco de LEDs. Se pueden diferenciar fácilmente dos partes en el proceso, una de reconocimiento del color del objeto y otra de imitación del mismo.

El primer problema que se nos plantea es cómo “medir” el color de un objeto. Para ello son necesarias ciertas nociones de colorimetría que se exponen en el capítulo siguiente y de las que podemos concluir que iluminando un objeto con los tres colores básicos (RGB Red-rojo Green-verde Blue-azul) y midiendo el nivel de luz reflejada por el objeto de cada fuente de color se puede obtener los datos necesarios para imitarlo.

En realidad se busca medir los niveles RGB y trasladarlos a los niveles del foco, pudiendo así reproducir el color.

Para poder imitar el color no se necesita definir qué color es exactamente, es decir, no se tiene que decidir si el color es rojo o naranja, sólo necesitamos saber los niveles de rojo, verde y azul que refleja el objeto y trasladarlos a los niveles RGB del foco y de esta forma obtener el color. Esto hace el trabajo más sencillo, ya que existen millones de colores con diferentes matices y por lo tanto es muy complicado clasificarlos todos bajo un nombre.

Como es lógico, una de las cuestiones que se plantea al iniciar el diseño es cuantos colores va a ser capaz de reproducir, es decir, cuáles van a ser las limitaciones del proyecto. Uno de los objetivos primordiales es que el sistema pueda imitar el mayor número posible de colores, por lo tanto se estudiará cuales son los mejores componentes y procedimientos para conseguirlo.

Otro objetivo que se plantea, más a nivel de diseño mecánico, es conseguir un sistema de fácil manejo, que se pueda transportar sin mucha dificultad y que se alimente directamente de la red. Se pretende diseñar un sistema definitivo, robusto y fiable.



1. Motivación del proyecto.

En la actualidad muchas empresas se dedican a desarrollar sistemas de iluminación artística. Una de estas empresas es GHESA, lleva más de 40 años diseñando, fabricando e instalando elementos de agua y luz con fines artísticos y ornamentales en diversos países.

El objetivo es acercar el mundo del agua a un mayor número de personas. Para conseguirlo utilizan la iluminación y la gestión del color en tiempo real. Un ejemplo claro son las fuentes cibernéticas. Están basadas en la sincronización de todos sus elementos mediante la incorporación de la informática. El agua, la luz y el sonido se funden para generar sinfonías audiovisuales.

Uno de las propuestas en este terreno es desarrollar un interfaz para el artista, con el fin de crear la composición deseada con la luz, el agua y el sonido. Un ejemplo son los sistemas de gestión de luz controlados por teclado midi.

Este tipo de sistemas empiezan a verse en otros espectáculos, como teatros o conciertos, y cada vez se investiga más en nuevas formas de expresión.

Este proyecto pretende avanzar un paso más en el terreno de iluminación artística y poner en las manos del artista una herramienta diferente de trabajo. Con el sistema podrá representar mediante la luz múltiples composiciones, proporcionando más versatilidad y creatividad.

2. Organización del documento.

Como se ha dicho anteriormente, para poder cumplir con los objetivos que se plantean y poder comprender adecuadamente el proyecto se necesita tener unas nociones básicas de colorimetría, fotodetectores y fuentes de luz, entre otros. Todos estos conceptos y definiciones vienen resumidos a modo de introducción en el capítulo 2.

Después de este estudio previo, en el capítulo 3 se explica cual es el sistema propuesto para alcanzar el objetivo marcado. Además se detallan los problemas que se han encontrado durante la fase de diseño y las soluciones que se le han aplicado. Este capítulo es muy importante para la comprensión del resto del documento ya que da al lector una visión general del sistema antes de entrar en detalle en cada una de las partes del mismo.



En el capítulo 4 se describe detalladamente el diseño hardware finalmente empleado, detallando los circuitos utilizados y la función de cada uno. A continuación, se explica los programas implementados para el correcto funcionamiento del sistema, es decir, el diseño software del mismo.

En el capítulo 6 se realiza una descripción del diseño mecánico del proyecto y del aspecto final del mismo, detallando cuales son los componentes utilizados y la disposición final de los mismos.

En el capítulo 7 se comentan los resultados obtenidos, es decir, la gama de colores que el sistema es capaz de reproducir. Es en el último capítulo donde se desarrollan las conclusiones, se examinan los problemas encontrados y se valoran si se han cumplido los objetivos marcados. Además, se presentan una serie de posibles líneas para continuar con el trabajo, intentando solventar los problemas encontrados y mejorando el diseño.

Finalmente en los anexos podemos encontrar el circuito completo del sistema, el código del programa y un estudio económico del proyecto.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN.

1. Introducción a la colorimetría.

Se define el color como una percepción visual que se genera en el cerebro al interpretar las señales nerviosas que le envían los fotorreceptores de la retina del ojo y que a su vez interpretan y distinguen las distintas longitudes de onda que captan de la parte visible del espectro electromagnético.

El espectro electromagnético (Figura 1) abarca las longitudes de onda que la luz puede tener. De todo el espectro, la porción que el ser humano es capaz de percibir es muy pequeña en comparación con las existentes. Esta región, denominada espectro visible, comprende longitudes de onda desde los 380 nm hasta los 780 nm. La luz de cada una de estas longitudes de onda es percibida en el cerebro humano como un color diferente.

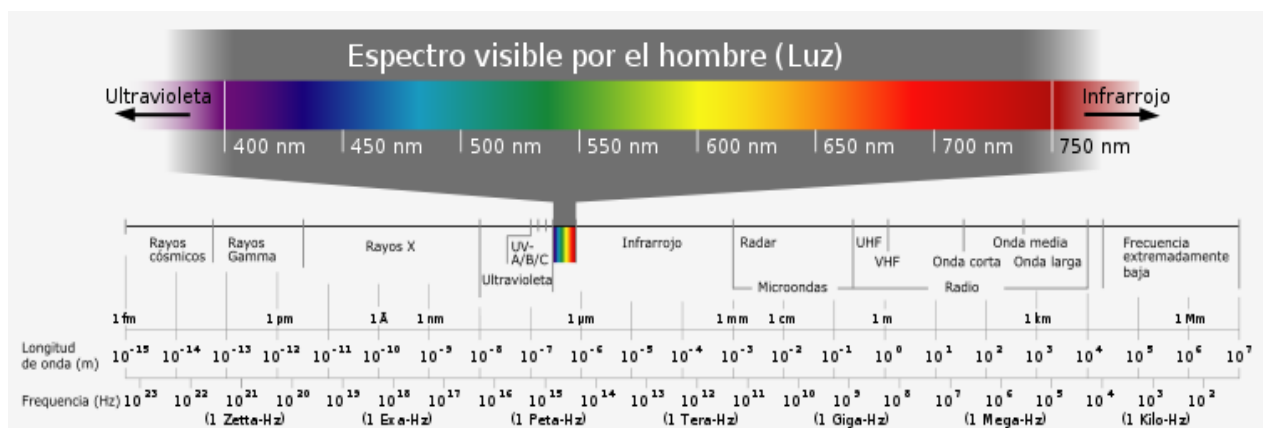


Figura 1 – Espectro electromagnético.

A pesar de que el espectro es continuo y por lo tanto hay solapamientos entre colores adyacentes, se puede establecer la aproximación mostrada en la tabla 1.

Color	Longitud de onda
violeta	~ 380-450 nm
azul	~ 450-495 nm
verde	~ 495-570 nm
amarillo	~ 570–590 nm
naranja	~ 590–620 nm
rojo	~ 620–750 nm

Tabla 1 – Longitud de onda de los principales colores

Todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes. Las ondas reflejadas son captadas por el ojo e interpretadas en el cerebro como colores según las longitudes de ondas correspondientes. Debe notarse que el color es una característica subjetiva, pues solo existe en el ojo y en el cerebro del observador humano, no siendo una característica propia de un objeto.

La colorimetría es la ciencia que estudia la medida de los colores y que desarrolla métodos para la cuantificación del color, es decir la obtención de valores numéricos que lo identifican.

Existe una necesidad de estandarizar el color para poderlo reproducir. El procedimiento utilizado en la medida del color consiste sustancialmente en sumar la respuesta de estímulos de colores y su normalización a la curva espectral de respuesta del fotorreceptor sensible al color. Los fotorreceptores del ojo humano son los conos de la

retina, de los que existen diferentes tipos, con sensibilidades diferentes a las distintas partes del espectro luminoso.

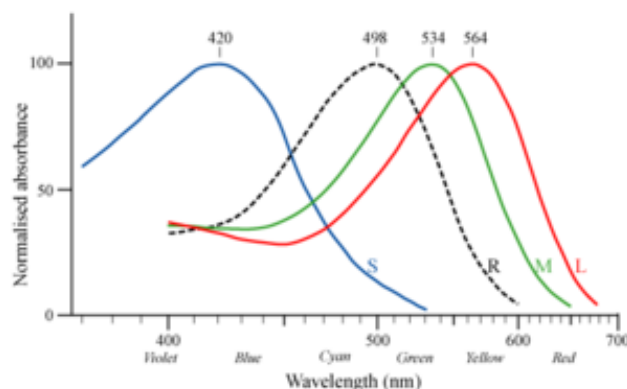


Figura 2- Curva espectral del ojo humano

En la visión humana, los conos captan la luz en la retina del ojo. Hay tres tipos de conos (denominados en inglés S, M, y L), cada uno de ellos capta solamente las longitudes de onda señaladas en la Figura 2. Transformadas en el cerebro se corresponden aproximadamente con el azul, verde y rojo. Los bastones captan las longitudes de onda señaladas en la curva R.

1.1. Tinte, saturación y luminancia.

Como ya se ha comentado se puede hablar de los colores como sensaciones fisiológicas. Para definir la visión de color se definen tres parámetros psíquicos:

- Tinte: estado puro del color.
- Saturación: grado de pureza. Un color está más saturado cuanto menor sea su contenido de grises o de blancos.
- Luminancia: característica que hace que este aparezca más claro, independientemente de su saturación.

Atendiendo a estos parámetros pueden distinguirse diferentes tipos de colores:

- Colores cromáticos definidos por el tinte y la saturación, mezcla de rojo, verde y azul.
- Colores acromáticos que se definen por su luminancia o brillo, como son el blanco, negro y gris.



- Colores saturados que son aquellos que tienen un espectro muy pequeño, en teoría una única longitud de onda.

1.2. *Leyes de la colorimetría.*

El matemático alemán Hermann Grassmann enunció unas leyes sobre la mezcla aditiva del color. Ellas muestran que cualquier color puede expresarse como suma de tres colores primarios (RGB Red-rojo Green-verde Blue-azul), es decir, de tres colores en los cuales uno no puede obtenerse por la mezcla de los otros dos. Aplicando sus leyes, se obtiene la denominada ecuación unitaria del color. En todos los casos se definen completamente la luminancia, tinte y saturación del color.

Las leyes son las siguientes:

- Un color de luminancia L se puede igualar mediante tres luminancias R, G y B o cantidades adecuadamente dosificadas de tres luces primarias convenientemente dosificadas.

$$L(x) = R(R) + G(G) + B(B)$$

- La luminancia de X es la suma de las luminancias de los colores integrantes primarios.

$$L = R + G + B$$

- Proporcionalidad: se puede escalar ambos miembros de la anterior igualdad por un mismo factor (1/L) manteniéndose la proporcionalidad.

$$1(X) = r(R) + v(V) + b(B)$$

- Adictividad: la luminancia de color resultante de una mezcla de colores es la suma de las luminancias de sus primarios.

$$L'' = \sum R + \sum V + \sum B$$



De estas reglas se puede sacar las siguientes conclusiones:

- Un color puede resultar de la superposición de muchas radiaciones espectrales.
- Un color es un vector formado por tres coordenadas (RGB), es decir se puede realizar un estudio matemático mediante un análisis espectral.

1.3. Carta xy CIE.

Existen diferentes métodos de determinar las componentes de brillo, tinte y saturación de un color. Se va introducir éste ya que es uno de los más sencillos en su manejo y de los más usados.

Una fuente de luz está representada en el plano o carta de colores por un punto colorimétrico xy, de crominancia fija y luminancia variable.

Se puede pasar mediante una transformación lineal del espacio RGB al XYZ con la ventaja de que este espacio resulta más intuitivo para representar los colores. Dado que esta transformación de espacios es lineal las leyes enunciadas se mantendrán en este espacio. Ahora las leyes de Grassman transformadas serán las siguientes:

$$L(C)=X(X)+Y(Y)+Z(Z)$$

$$1=x+y+z$$

De esta última ecuación se deduce que sólo se necesitan dos coordenadas para determinar las propiedades cromáticas de la luz. Esto desde un punto de vista matemático representa un plano.

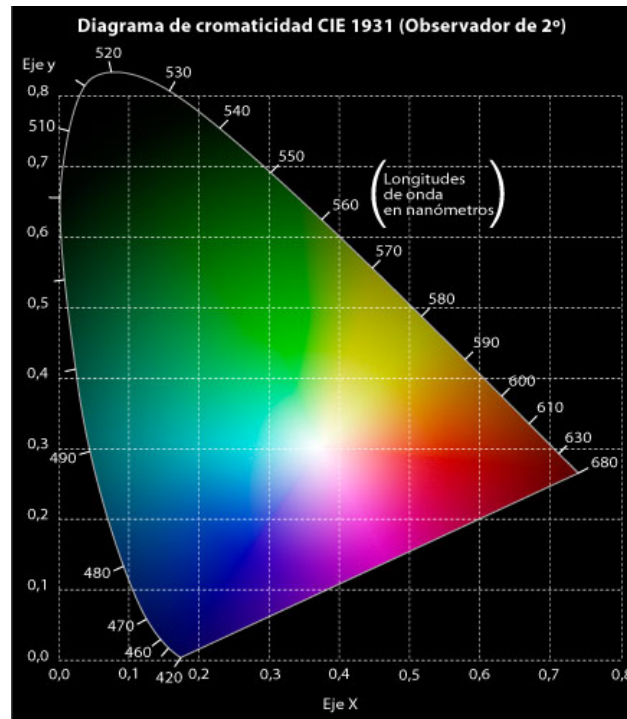


Figura 3 – Colores en el diagrama de cromaticidad xy CIE

Los colores de los bordes son saturados, es decir monocromáticos, y dentro de la carta son mezclas. Solamente se produce el blanco cuando la proporción de los componentes es adecuada, en caso contrario se produce un color terciario más o menos saturado.

2. Fuentes de luz.

Se va a realizar una breve exposición de las diferentes fuentes de luz que se pueden emplear.

La primera y más importante es la luz solar. Esta luz contiene todos los colores de la luz visible y todo el rango de radiaciones infrarrojas y ultravioleta, es decir, contiene todo el espectro electromagnético. En la figura 4 se puede ver la distribución de las diferentes longitudes de onda de la luz solar al nivel del mar, representadas en longitudes de onda v/s intensidad luminosa. El espectro es bastante homogéneo.

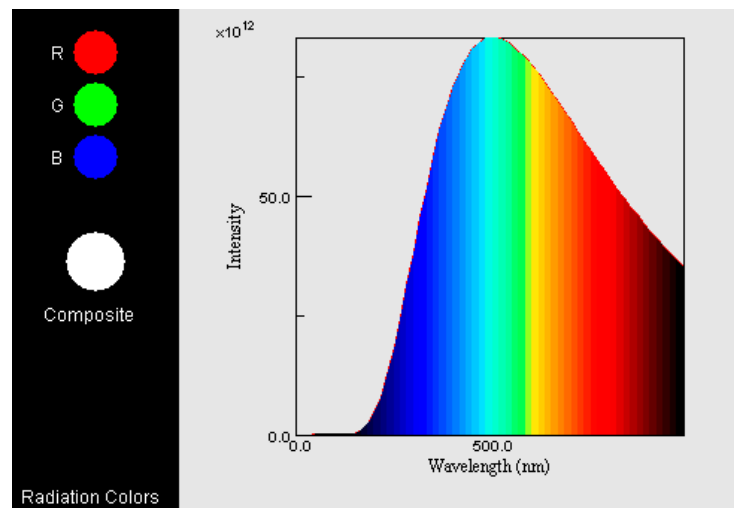


Figura 4 - Espectro de la luz solar.

Una segunda fuente de luz son las lámparas incandescentes, que están formadas por un fino filamento de tungsteno en el interior de una envoltura de cristal a la que se le ha hecho el vacío. Al pasar una intensidad eléctrica por el filamento se vuelve incandescente. Se puede aumentar la luminosidad y la vida de la lámpara llenando el recipiente con gas nitrógeno, argón o kriptón. Una variedad de estas lámparas son las halógenas que son capaces de dar más luz al tener un recipiente de cuarzo lleno de un gas halógeno como el yodo.

El espectro de las lámparas halógenas está cargado de luz amarilla, roja e infrarrojos como se puede ver en la figura 5. Por este motivo la luz es amarillenta.

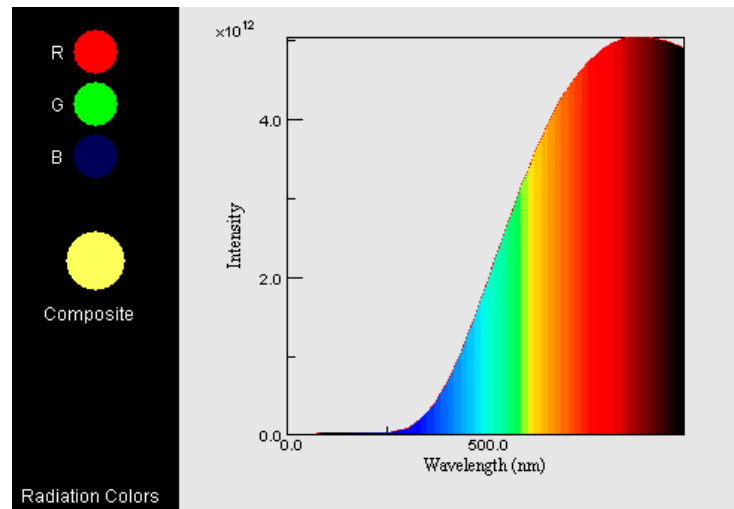


Figura 5- Espectro de una lámpara halógena.

Otro tipo de lámparas son las fluorescentes que consisten en una descarga de vapor de mercurio a baja presión dando a lugar a una emisión desde el infrarrojo hasta el ultravioleta abarcando el espectro visible en su totalidad.

También existen lámparas basadas en la descarga de vapor de mercurio pero a alta presión cuya emisión abarca parte del espectro visible y ultravioleta. Un tipo de este tipo de lámparas es la luz mezcla o los halogenuros metálicos.

Nos podemos encontrar también lámparas basadas en descargas de vapor de sodio tanto en baja como en alta presión, las cuales mantienen una buen compromiso entre rendimiento de color y eficiencia luminosa.

Las lámparas de inducción excitan los átomos de vapor de mercurio a través de un campo inducido. Emiten ultravioleta por lo que es necesario un recubrimiento fluorescente de la ampolla para emitir el espectro visible.

Otra fuente emisora, más importante en lo que respecta al campo de la electrónica, es el diodo emisor o LED. Los LEDs se utilizan en la electrónica por su bajo coste y por tener una larga vida. El LED es una unión semiconductor PN formando un diodo que emite luz visible cuando es polarizado de forma directa.

Los LEDs emiten en una banda de luz relativamente estrecha. El color (longitud de onda), depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo.

A continuación se muestra la tabla 2 de algunos de los materiales empleados en la fabricación de los LEDs y la longitud de onda emitida.

Compuesto	Color	Long. de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940nm
Arseniuro de galio y aluminio	Rojo e infrarrojo	890nm
Arseniuro fosfuro de galio	Rojo, naranja y amarillo	630nm
Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525nm
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450nm
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480nm
Diamante (C)	Ultravioleta	400nm

Tabla 2 – Materiales y longitudes de onda frecuentes en los LEDs

En la figura 6 se muestra el espectro de LEDs de diferentes colores, azul, verde y amarillo. Como se puede observar el espectro de cada uno de estos LEDs es estrecho al contrario que las lámparas incandescentes o la luz solar que emiten en un amplio rango de longitudes de onda.

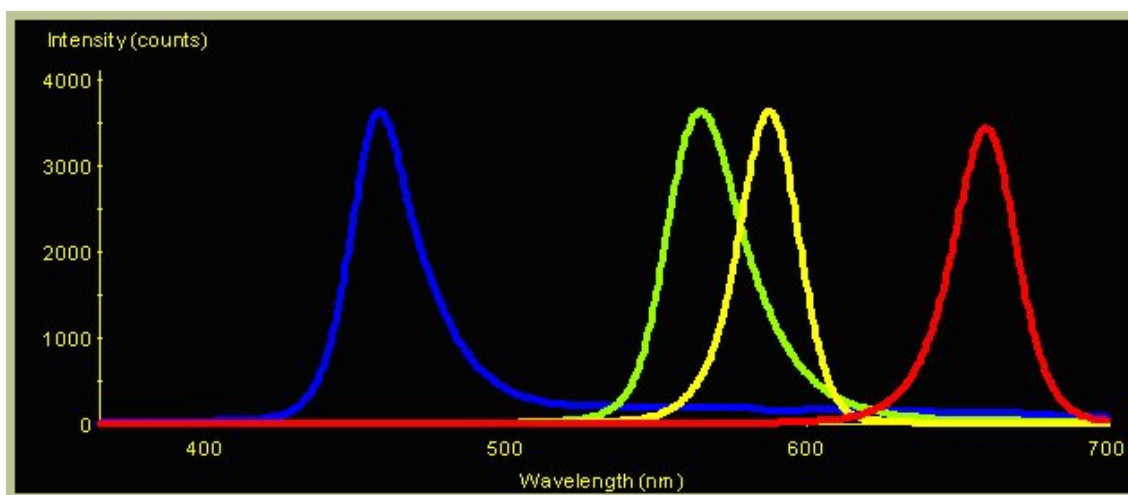


Figura 6 – Espectro de diferentes diodos.

El funcionamiento físico consiste en que, en los materiales semiconductores, un electrón al pasar de la banda de conducción a la de valencia, pierde energía; esta energía perdida se puede manifestar en forma de un fotón desprendido, con una amplitud, una dirección y una fase aleatoria. El que esa energía perdida cuando pasa un electrón de la banda de conducción a la de valencia se manifieste como un fotón desprendido o como otra forma de energía (calor por ejemplo) va a depender principalmente del tipo de material semiconductor. Cuando un diodo semiconductor se polariza directamente, los huecos de la zona p se mueven hacia la zona n y los electrones de la zona n hacia la zona p; ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo. Si los electrones y huecos están en la misma región, pueden recombinarse, es decir, los electrones pueden pasar a "ocupar" los huecos, "cayendo" desde un nivel energético superior a otro inferior más estable. Este proceso emite con frecuencia un fotón en semiconductores de banda prohibida directa o "direct bandgap" con la energía correspondiente a su banda prohibida. Esto no quiere decir que en los demás semiconductores (semiconductores de banda prohibida indirecta o "indirect bandgap") no se produzcan emisiones en forma de fotones; sin embargo, estas emisiones son mucho



más probables en los semiconductores de banda prohibida directa (como el Nitruro de Galio) que en los semiconductores de banda prohibida indirecta (como el Silicio).

La emisión espontánea, por tanto, no se produce de forma notable en todos los diodos y sólo vale en diodos como los LEDs de luz visible, que tienen una disposición constructiva especial con el propósito de evitar que la radiación sea reabsorbida por el material circundante, y una energía de la banda prohibida coincidente con la correspondiente al espectro visible. En otros diodos, la energía se libera principalmente en forma de calor, radiación infrarroja o radiación ultravioleta. En el caso de que el diodo libere la energía en forma de radiación ultravioleta, se puede conseguir aprovechar esta radiación para producir radiación visible, mediante sustancias fluorescentes o fosforescentes que absorban la radiación ultravioleta emitida por el diodo y posteriormente emitan luz visible.

El dispositivo semiconductor está comúnmente encapsulado en una cubierta de plástico de mayor resistencia que las de vidrio que usualmente se emplean en las lámparas incandescentes. Aunque el plástico puede estar coloreado, es sólo por razones estéticas, ya que ello no influye en el color de la luz emitida.

Para obtener una buena intensidad luminosa debe escogerse bien la corriente que atraviesa el LED; para ello, hay que tener en cuenta que el voltaje de operación va desde 1,8 hasta 3,8 voltios aproximadamente (lo que está relacionado con el material de fabricación y el color de la luz que emite) y la gama de intensidades que debe circular por él varía según su aplicación. Valores típicos de corriente directa de polarización de un LED están comprendidos entre los 10 y los 40 mA. Existen también LEDs de alta potencia que trabajan a corrientes 150 mA, 350 mA, 750 mA o incluso a 1000 mA que producen una gran intensidad luminosa.

La última fuente de luz que se considera es el láser. En la actualidad debido a sus propiedades distintivas es un usado una gran cantidad de aplicaciones.

Una de sus principales características es la capacidad de emitir luz de un color específico o longitud de onda. Es decir, emite una luz monocromática. Existen diferentes tipos de láser. Los de helio-neón emiten luz a una sola longitud de onda determinada mientras que los de argón generan dos ondas distintas. En la tabla 3 se recogen los diferentes tipos de láseres y la longitud de onda que emiten.

Tipo	Longitud de onda
Argón	488 – 514.5 nm
Dióxido carbónico	10.6 μm
Cadmio	442 – 325 nm
Helio-Neón	632.8 nm
Nitrógeno	337 nm
Criptón	647 nm
Nd-YAG	1064 nm
Rubí	694.3 nm
Diodo láser	780 – 840 – 904 nm

Tabla 3 – Tipos y longitudes de onda de los láseres.

Hay cuatro tipos principales de láseres: sólidos, líquidos, gaseosos y semiconductores.

Los láseres de gas más utilizados para experimentación hasta la actualidad con los de helio-neón. Consiste en un tubo de vacío lleno 10 partes de helio y una de neón a una presión de 1 mm/Hg. Se colocan unos electrodos a los extremos del tubo para conseguir ionizar los gases. Además se montan dos espejos en los extremos del tubo de modo que forman un resonador óptico. Para eso un espejo tiene que ser totalmente reflectivo mientras que el otro extremo sólo parcialmente reflectivo.

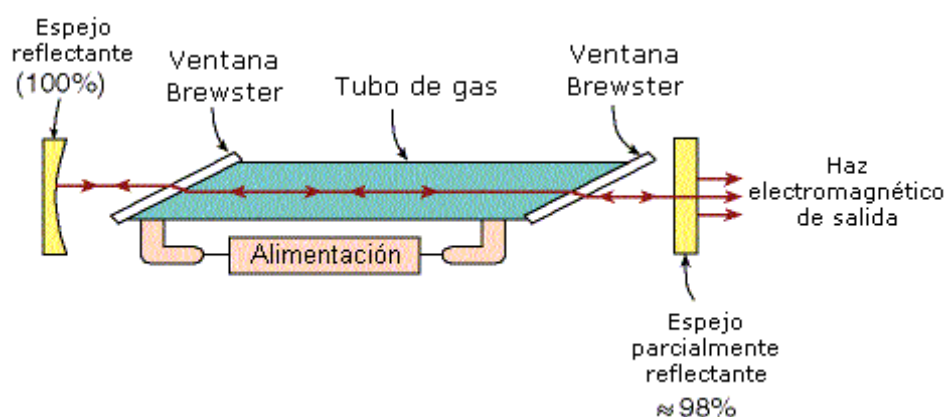


Figura 7 – Tubo de He-Ne



Este láser se emplea en los supermercados para escanear los precios de los artículos. Además es relativamente barato y fácil de montar. Emite una luz roja característica a 638.2 nm.

Otros láseres de gas son los de cadmio, argón, criptón y dióxido carbónico, utilizados usualmente para realizar cortes y trabajos de alta potencia y en aplicaciones militares.

Los láseres de semiconductor o sólidos se emplean en gran cantidad de aparatos electrónicos incluidos los compact-disks, impresoras o lectores de código de barras.

Un diodo láser consiste en una unión PN con superficies especialmente refractarias. Cuando aplicamos una corriente a la unión el diodo láser emite luz. La luz rebota arriba y abajo entre las dos superficies que reflejan la onda dentro de la cavidad óptica. La emisión de cada cara del espejo forma una onda con un ángulo de entre 15° y 30°. Se utilizan en múltiples aplicaciones, por ejemplo en lectores de DVD y CDs.

3. Receptores.

Una vez descrito los principales emisores se va a realizar una exposición de los principales sensores de luz, sensores ópticos y de colores que existen en el mercado. Es necesario conocer tanto los emisores como los receptores si se quiere desenvolverse con éxito en el campo del diseño de sistemas optoelectrónicos.

3.1. Sensores de luz.

Existen varias clases de sensores de luz. Las más importantes son las fotorresistencias, fotodiodos, fototransistores, células fotovoltaicas y tubos fotomultiplicadores.

Una **fotorresistencia** es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. Puede también ser llamado fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuyas siglas, LDR, se originan de su nombre en inglés *light-dependent resistor*. Su cuerpo está formado por una célula o celda y dos patillas. En la figura 8 se muestra su símbolo eléctrico y su aspecto físico.



Figura 8 – Símbolo de una fotorresistencia

El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (puede descender hasta 50 ohmios) y muy alto cuando está a oscuras (varios mega ohmios). Una fotorresistencia está hecha de un semiconductor de alta resistencia como el sulfuro de cadmio, CdS. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por el semiconductor dando a los electrones la suficiente energía para saltar la banda de conducción. El electrón libre que resulta, y su hueco asociado, conducen la electricidad, de tal modo que disminuye la resistencia. Los valores típicos varían entre 1 MΩ, o más, en la oscuridad y 100 Ω con luz brillante.

Las células son también capaces de reaccionar a una amplia gama de frecuencias, incluyendo infrarrojo (IR), luz visible, y ultravioleta (UV).

La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. Esta lentitud da ventaja en algunas aplicaciones, ya que se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (ej. tubo fluorescente alimentado por corriente alterna). En otras aplicaciones (saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante.

Se fabrican en diversos tipos y pueden encontrarse en muchos artículos de consumo, como por ejemplo en cámaras, medidores de luz, relojes con radio, alarmas de seguridad o sistemas de encendido y apagado del alumbrado de calles.

Un **fotodiodo** es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Debido a su construcción, los fotodiodos en ausencia de luz exterior generan una tensión muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. Esta corriente presente en ausencia de luz recibe el nombre de corriente de oscuridad.



Figura 9 – Símbolo y aspecto físico de un fotodiodo

Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama polarización directa. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente (que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la unión del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa.

Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

El material empleado en la composición de un fotodiodo es un factor crítico para definir sus propiedades. En la tabla 4 se refleja algunos de los materiales en la fabricación de estos fotodiodos y la longitud de onda que son capaces de detectar.

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	190–1100
Germanio	800–1700
Indio galio arsénico (InGaAs)	800–2600
sulfuro de plomo	<1000-3500

Tabla 4 – Materiales y longitudes de onda frecuentes en los fotodiodos

También es posible la fabricación de fotodiodos para su uso en el campo de los infrarrojos medios (longitud de onda entre 5 y 20 μm), pero estos requieren refrigeración por nitrógeno líquido.

A diferencia del LDR, el fotodiodo responde a los cambios de oscuridad a iluminación y viceversa con mucha más velocidad, y puede utilizarse en circuitos con tiempo de respuesta más pequeño.

Se usa en los lectores de CD, recuperando la información grabada en el surco del Cd transformando la luz del haz láser reflejada en el mismo en impulsos eléctricos para ser procesados por el sistema y obtener como resultado los datos grabados.

Se llama **fototransistor** a un transistor sensible a la luz, normalmente a los infrarrojos. La luz incide sobre la región de base, generando portadores en ella. Esta carga de base lleva el transistor al estado de conducción. El fototransistor es más sensible que el fotodiodo por el efecto de ganancia propio del transistor. Su respuesta es más rápida que las células resistivas, típicamente del orden de microsegundos.

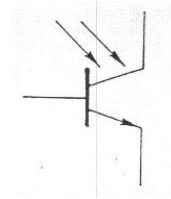


Figura 10 – Símbolo y aspecto físico de un fototransistor

En realidad todos los transistores son sensibles a la luz. Los fototransistores no hacen más que aprovechar esta cualidad consiguiendo mayor sensibilidad y eficiencia. Van montados en integrados sin epoxy lo que permite a la luz alcanzar la región de la base del dispositivo. La unión de la base es mayor que la de los transistores convencionales. Cuando la luz incide en el fototransistor permite que la corriente fluya de una fuente externa.

Se han utilizado en lectores de cinta y tarjetas perforadas, lápices ópticos, etc. Se utilizan ampliamente encapsulados conjuntamente con un LED, formando interruptores ópticos (*opto-switch*), que detectan la interrupción del haz de luz por un objeto. Existen en dos versiones: de transmisión y de reflexión.

Existen también fototransistores con un segundo transistor incluido en el chip para amplificar su salida. Son los transistores Darlington y presenta la gran ventaja de ser más sensibles que los convencionales, por ello son los que se utilizan en circuitos de control y comunicación.



Otro sensor de luz son las **células fotovoltaicas** o células solares. Es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotovoltaico.

Están compuestas de un material que presenta efecto fotoeléctrico: absorben fotones de luz y emiten electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye.

Al grupo de células fotoeléctricas para energía solar se le conoce como panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V ó 24V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si necesitamos corriente alterna o aumentar su tensión, tendremos que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia.

Las células solares se utilizan también como detectores de luz y son sensibles a la luz visible y además a una región cercana al infrarrojo. Típicamente responden a cambios de luz a una velocidad de unos 20 microsegundos.

Finalmente describiremos el tubo **fotomultiplicador**. Los **fototubos** son un tipo de transductores sensibles a la luz, la cual se transforma en corriente eléctrica. Están formados por un tubo que se encuentra vacío o relleno con algún gas inerte (argón o similar). Actualmente han sido sustituidos en gran medida por las fotorresistencias y los fotodiodos.

Este dispositivo funciona según el efecto fotoeléctrico: los fotones inciden sobre un cátodo, generando electrones que son atraídos por el ánodo. La corriente que se genere en el tubo depende de la frecuencia (o longitud de onda) y de la intensidad de la luz incidente. El espectro de radiación al que responde el cátodo viene determinado por el material de éste.



Los tubos fotomultiplicadores son fototubos en los cuales se produce amplificación. El sistema se caracteriza por su respuesta rápida y elevada sensibilidad (instrumento de medida).

4. Fibra óptica.

La **fibra óptica** es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos. Un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el núcleo de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED.

La fibra óptica es una guía de ondas dieléctrica que opera a frecuencias ópticas.

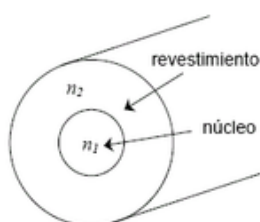


Figura 11 - Núcleo y revestimiento de la fibra óptica.

Cada filamento consta de un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor. Cuando la luz llega a una superficie que limita con un índice de refracción menor, se refleja en gran parte, cuanto mayor sea la diferencia de índices y mayor el ángulo de incidencia, se habla entonces de reflexión interna total.

Así, en el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de tal forma que prácticamente avanza por su centro. De este modo, se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

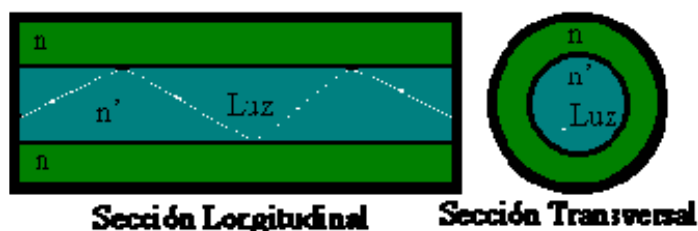


Figura 12 - Secciones de la fibra óptica.

Se puede destacar diferentes ventajas de usar este sistema de transmisión:

- Su ancho de banda es muy grande, gracias a técnicas de multiplexación por división de frecuencias (X-WDM), que permiten enviar hasta 100 haces de luz (cada uno con una longitud de onda diferente) a una velocidad de 10 Gb/s cada uno por una misma fibra, se llegan a obtener velocidades de transmisión totales de 1 Tb/s.
- Es inmune totalmente a las interferencias electromagnéticas.
- Es segura. Al permanecer el haz de luz confinado en el núcleo, no es posible acceder a los datos transmitidos por métodos no destructivos.
- Se puede instalar en lugares donde puedan haber sustancias peligrosas o inflamables, ya que no transmite electricidad.

A pesar de las ventajas antes enumeradas, la fibra óptica presenta una serie de desventajas frente a otros medios de transmisión, siendo las más relevantes las siguientes:

- La alta fragilidad de las fibras.
- Necesidad de usar transmisores y receptores más caros.
- Los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, especialmente en el campo, lo que dificulta las reparaciones en caso de ruptura del cable.
- No puede transmitir electricidad para alimentar repetidores intermedios.
- La necesidad de efectuar, en muchos casos, procesos de conversión eléctrica-óptica.
- La fibra óptica convencional no puede transmitir potencias elevadas.
- No existen memorias ópticas.

Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra se denominan modos de propagación. Y según el modo de propagación tendremos dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo.

Una fibra multimodo es aquella en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km; es simple de diseñar y económica. Su distancia máxima es de 2 km y usan diodos láser de baja intensidad.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Dependiendo el tipo de índice de refracción del núcleo, tenemos dos tipos de fibra multimodo:

- Índice escalonado: en este tipo de fibra, el núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica, tiene alta dispersión modal.

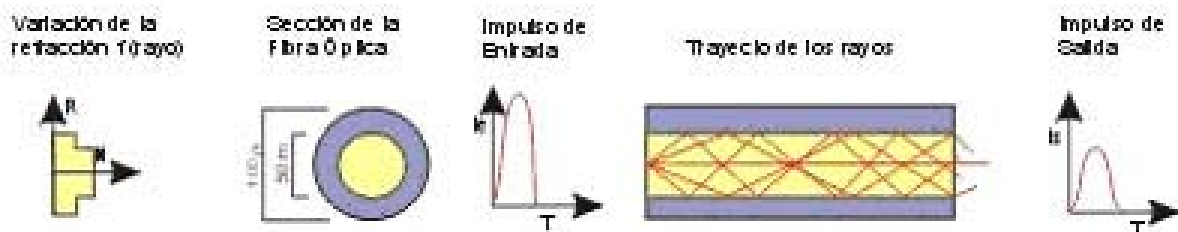


Figura 13 – Comportamiento fibra óptica multimodo índice escalonado.

- Índice gradual: mientras en este tipo, el índice de refracción no es constante, tiene menor dispersión modal y el núcleo se constituye de distintos materiales.



Figura 14 – Comportamiento fibra óptica multimodo índice gradual

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño (8,3 a 10 micrones) que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias (hasta 100 km máximo, mediante un láser de alta intensidad) y transmitir elevadas tasas de información (decenas de Gb/s).

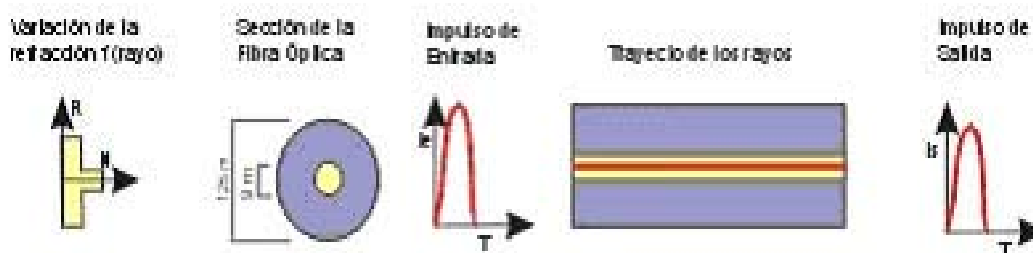


Figura 15 – Comportamiento fibra óptica monomodo.

Como antes se ha señalado existen dos tipos de fibras ópticas según el material del que estén fabricadas: vidrio o plástico. La fibra óptica de plástico (FOP) constituye un medio más barato y fácil de manejar que la fibra óptica de vidrio ajustándose más de esta forma a las necesidades del presente proyecto.

Por lo tanto se van a describir ciertos parámetros típicos de las fibras ópticas de plástico que deberán de tenerse en cuenta para la realización del sistema propuesto.

- **Apertura numérica.**

El núcleo constituye el soporte físico de la radiación óptica mientras que la cubierta ayuda al confinamiento de dicha radiación en el núcleo. Para que la luz se introduzca en la fibra óptica el ángulo de incidencia en la interfaz de los dos materiales debe ser tal que se produzca la reflexión total. Existirá un ángulo máximo de entrada por encima del cual la luz no se propagará por la fibra óptica. Este ángulo se llama ángulo máximo de incidencia. Como consecuencia toda la radiación con un ángulo de entrada menor o igual se transmitirá.



- **Atenuación.**

Las pérdidas que sufre la señal óptica se denomina atenuación de la fibra. De forma general se miden en dB/Km aunque en el caso de las FOP se miden en dB/m. Existen dos tipos de pérdidas:

- Intrínsecas: dependen del material con el que se fabrica la fibra y representan el límite teórico.
- Extrínsecas: son ajenas a la fibra considerada como ideal y son debidas, entre otros factores, a impurezas, defectos en la geometría de la fibra, defectos del cableado, etc.

Las pérdidas están fuertemente relacionadas con la longitud de onda, es decir, la atenuación varía a lo largo del espectro, dando lugar a lo que se conoce como ventanas de transmisión, interesantes en comunicaciones por ser aquellas en las que la atenuación se hace menor. En el caso de las FOP se sitúa en el rango visible, en el entorno de los 635nm.



5. Microprocesador ARM 7.

Las razones más importantes por las que se ha escogido el microprocesador ARM7 son las siguientes:

- Buena relación entre precio y prestaciones del microprocesador.
- Facilidad de uso.
- Entorno de desarrollo muy completo para el diseño.

El ARM7 es un microprocesador de 32 bit, lo que le permite su aplicación en multitud de diseños. La potencia del microprocesador es más que suficiente para el presente proyecto. Además su coste no es muy elevado.

Otro factor determinante en la elección de este microprocesador es su fácil manejo al poder ser programado en lenguaje C. C es un lenguaje de propósito general, por lo que puede ser aplicado a casi todos los entornos. Se considera un lenguaje de “medio-nivel”, ya que con una sintaxis de alto nivel, permite trabajar con el sistema a muy bajo nivel. Se trata de un lenguaje:

- Estructurado.
- Sensible a Mayúsculas/Minúsculas.
- La finalización de las sentencias se realiza con ;
- La agrupación de sentencias se realiza con {...}.

El sistema de desarrollo utilizado es Keil μ Vision. Este sistema tiene una gran flexibilidad a la hora de diseñar ya que pone al alcance del diseñador la creación de proyectos, ensamblado y simulación, y emplea el adaptador USB JTAG para la descarga de programas a la placa de evaluación.

El fabricante de la placa de evaluación (Keil Software) pone al alcance del usuario numerosa información de sus productos y entre ellos del ARM, microcontrolador que vamos a emplear. En <http://www.keil.com/arm/> encontramos los enlaces a manuales y documentación de uso de algunas de las herramientas que se emplean en el presente proyecto.



El uvision3 nos permite realizar la simulación empleando una herramienta que asemeja el funcionamiento que tendría el microcontrolador. Podemos ejecutar paso a paso, sin entrar en subrutinas, ejecutar hasta el cursor... Y al mismo tiempo se permite ver como van cambiando los valores de los registros.

Al contrario de la simulación, la depuración permite volcar el programa al microcontrolador y ejecutarlo de manera controlada. En el caso de la depuración no estamos empleando una herramienta que simule el funcionamiento, estamos usando el propio microcontrolador. La simulación se emplea para observar el funcionamiento del programa, sin embargo para comprobar el funcionamiento del sistema (tanto el programa como hardware que se emplea) se usa el depurador.

4.1. Características más relevantes del ARM7.

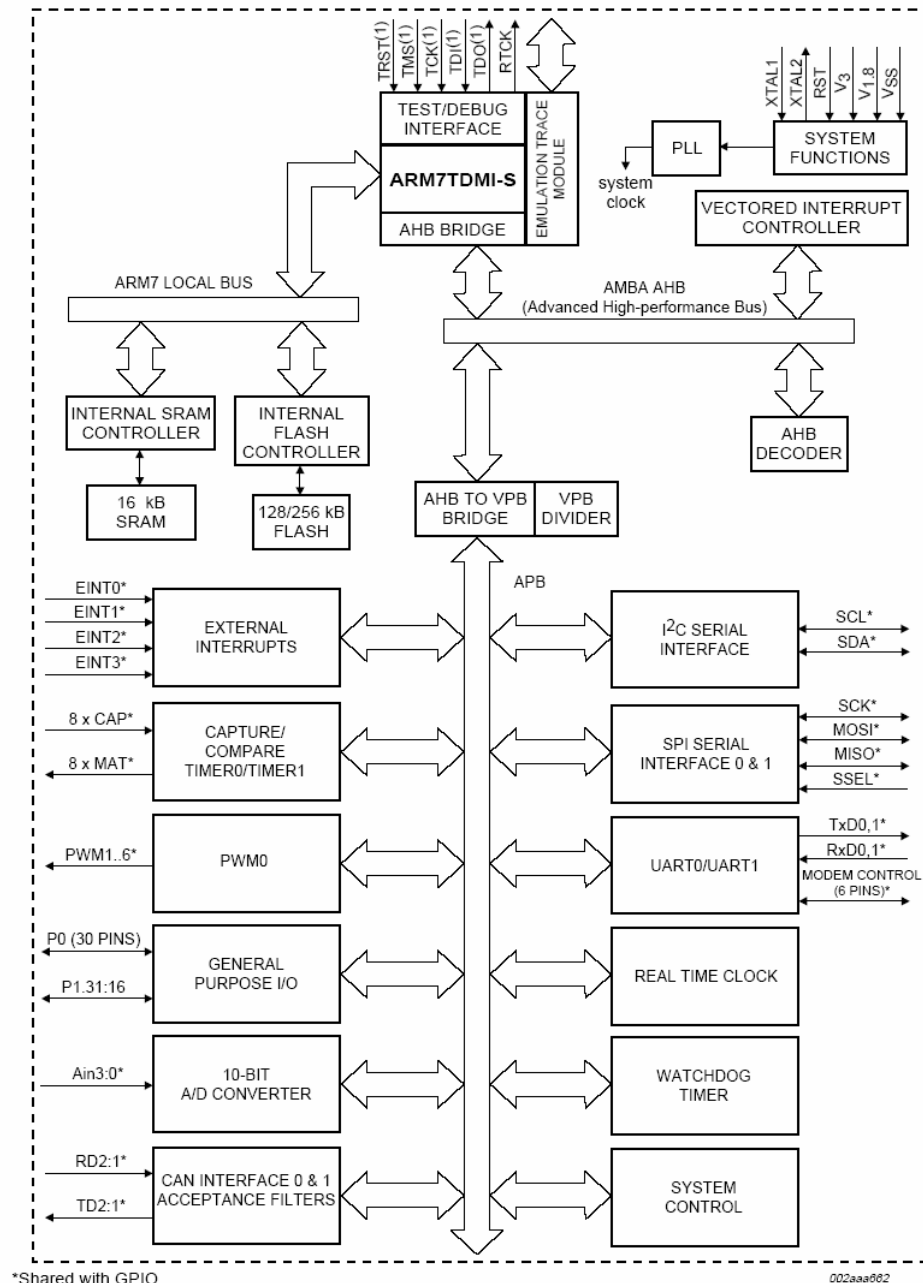
La arquitectura ARM (Advanced RISC Machine) fue creado en 1985 por el Acorn Computer Group, como el primer procesador RISC con gran impacto comercial en el mundo.

La filosofía RISC (Reduced Instruction Set Computer) es que la eficiencia viene de hacer las cosas menos complicadas. Gracias a su diseño sencillo, el ARM tiene relativamente pocos componentes en el chip, por lo que no alcanza altas temperaturas y tiene bajos requerimientos de energía. Lo anterior lo ha hecho candidato perfecto para el mercado de aplicaciones empotradas (embedded applications) que van desde un teléfono celular hasta una lavadora.

La implementación más exitosa ha sido el ARM7TDMI, con miles de millones vendidos. El LPC2148 fabricado por Philips utilizado en este proyecto está basado en esta CPU. Incluye:

- 256KB de memoria Flash.
- 16KB de RAM estática.
- Mecanismo de ISP e ICE-RT.
- Controlador de Interrupciones Vectorizadas.
- Con prioridades configurables.
- 2 Puertos Serie Asíncronos (UART0 y UART1).
- Puertos Serie Síncronos (Fast I2C y SPI).
- 2 Temporizadores de 32 bits.

- 4 canales IC, 4 OC, PWM con 6 salidas, RTC y Watchdog.
- 4 canales de ADC de 10 bits.
- 46 pines de propósito general que toleran 5V.
- 9 entradas de IRQ externa sensible por nivel o flanco.
- 2 modos de bajo consumo (Idle y Power-down).
- 2 canales de CAN-bus.



(1) When test/debug interface is used, GPIO/other function sharing these pins are not available.

Figura 16- Diagrama de bloques del LPC2148

El mapa de memoria del microprocesador está dividido en diferentes partes tal y como muestra la figura 17:

- 256KB Flash
- 16KB RAM estática
- Bloque de Arranque
- Periféricos conectados al bus VPB
- Periféricos conectados al bus AHB

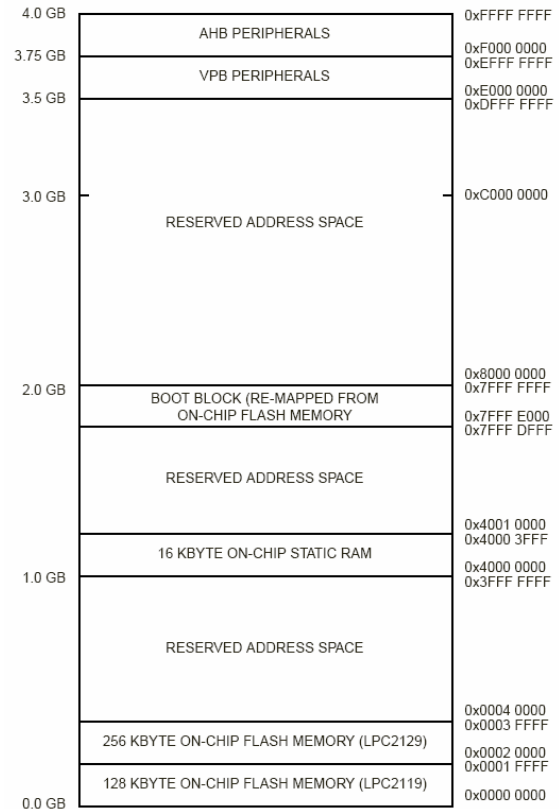


Figura 17 – Mapa de memoria LPC2148

Todo periférico, por complejo que sea, va a ser visto por la CPU como un conjunto de registros de datos, los que van a contener los datos que se van a utilizar en el periférico y que se comunicarán a/desde la CPU, de estado, que van a contener información sobre el estado en el que se encuentra el periférico, y de control, que se van a escribir para configurar el periférico.

Para acceder a dichos registros, la CPU podrá hacerlo de dos formas, mediante instrucciones especiales de E/S o como si fuese acceder a una dirección de memoria. Todos los registros de los periféricos de E/S van a verse como direcciones de memoria y la salida de cada uno de los periféricos se harán a través de los mismos pines que los de propósito general.

CAPÍTULO 3. SISTEMA PROPUESTO.

En este capítulo se va a realizar una exposición general del sistema propuesto para tener una visión global del diseño y de las soluciones aplicadas. De esta forma se busca una mejor comprensión del proyecto y del resto del documento.

Una vez estudiados los principios básicos de colorimetría se puede determinar que la forma más sencilla de captar el color de un objeto es iluminarlo con tres focos: rojo, verde y azul, y medir la luz reflejada.

Tras el estudio realizado en el capítulo 2, los LEDs parecen el sistema de iluminación más sencillo y funcional. Son baratos, ocupan poco espacio, consumen menos que otras fuentes y existen las tres tonalidades necesarias. Además, se ha escogido LEDs de alta potencia para obtener una alta intensidad luminosa.

La elección de los colores rojo, verde y azul se debe a que a través de la combinación de estos tres colores podemos obtener cualquier otro color. El inconveniente de los LEDs es que no emiten colores puros y por lo tanto el sistema no es capaz de reproducir todos los colores. En capítulos posteriores se entra en detalle en este tema y se realiza un estudio de los colores que puede llegar a reproducir.

El modo más sencillo y el finalmente aplicado es el de iluminar secuencialmente el objeto con los tres LEDs obteniendo de esta forma tres medidas relacionadas con el color del objeto. Estas medidas una vez calibradas y procesadas serán capaces de poder reproducir el color.

Para medir el nivel de luz reflejada se ha utilizado el chip APDS-9002. Es un fototransistor, su salida es analógica y tiene una respuesta muy cercana al ojo humano, como se puede ver en la figura 19, por lo tanto capta todo el espectro visible.

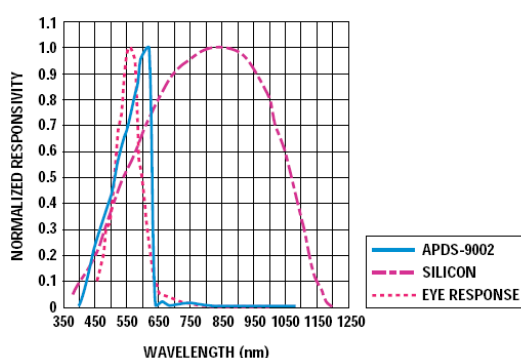


Figura 19 – Respuesta espectral de fototransistor APDS-90002



El chip APDS-9002 se configura de tal forma que su salida sea en voltios. El circuito de acondicionamiento del chip se explicará detalladamente en el siguiente capítulo en el que se definirá el diseño hardware del sistema.

En este punto del diseño se plantea el problema de cómo dirigir la luz de los LEDs al objeto y de la luz reflejada al sensor. En un principio se pensó posicionar los LEDs cerca del sensor de tal forma que la luz reflejada incidiera en el sensor. Pero esta solución no parecía muy efectiva.

Rápidamente surgió la idea de dirigir la luz a través de fibra óptica. Como se ha visto en el capítulo anterior la fibra óptica está diseñada para enviar datos en forma de pulsos de luz. En este caso, la propia información es la luz por lo que la fibra óptica se adapta perfectamente para el caso que se plantea.

La fibra óptica utilizada es de plástico, de menor calidad que otros materiales pero suficiente para las necesidades de nuestro proyecto. La longitud de la fibra óptica es de un metro por lo que las pérdidas producidas son mínimas en la fibra de plástico.

Se necesita una fibra óptica por cada LED y otra para que le llegue la luz reflejada al sensor, en total cuatro. Las fibras ópticas están unidas dentro de una cubierta protectora para que la luz exterior no les afecte y pueda interferir en las medidas y para que se transfiera la máxima cantidad posible de luz reflejada por el objeto.

Una vez tomadas las medidas se procesan para poder reproducir el color. Es en este momento donde entra en juego el microprocesador.

Se ha escogido el microprocesador LPC2148. Como se ha visto en el segundo capítulo es un microprocesador potente e incluye cuatro canales ADC. Se encarga de realizar la conversión analógica-digital y realizar los cálculos oportunos para enviar la información necesaria al foco y así reproducir el color del objeto. También realiza al encendido secuencial de los LEDs.

Llegados a este punto tenemos los datos de la luz reflejada por el objeto almacenados en el microprocesador. El siguiente paso es procesarlos para que se conviertan en información útil para el control del foco.

El driver del foco funciona con señales tipo PWM. En concreto por tres, una por cada color. Si el ciclo de trabajo de la señal del color rojo es del 100% los diodos rojos se encenderán al 100% de su intensidad luminosa, si es del 50 % al 50 % de sus posibilidades y así sucesivamente.



Por lo tanto, el microprocesador debe crear tres señales PWM en las que el ciclo de trabajo sea proporcional a la cantidad de luz reflejada por cada color.

Tal como se ha descrito hasta ahora el funcionamiento teórico del sistema es muy sencillo. En esencia un objeto rojo reflejará casi en su totalidad la luz roja mientras que el nivel de luz reflejada verde y azul será mucho menor, y lo mismo sucederá con objetos verdes y azules. Los colores intermedios reflejarán en proporción a su mezcla de colores puros.

El problema reside en que se necesita una referencia para saber la proporción de cada color y cuál es el nivel máximo de luz que puede reflejar un objeto. Es decir, qué color es el que refleja toda la luz que emite el sistema de iluminación.

En un principio se planteó encontrar un objeto que reflejará un color puro, ya sea rojo, verde o azul. Pero pronto se desechó la idea, ya que estamos hablando de encontrar un objeto que emita una longitud de onda exacta cuando se le ilumina. Además, no sólo depende del objeto sino del sistema de iluminación. No sólo necesitábamos un objeto de color puro, también una fuente de luz que emitiera ese color puro para establecer así la proporción.

La solución se encuentra en el blanco. Este color refleja todas las longitudes de onda del espectro visible. Cuando se ilumine un objeto blanco con luz roja se reflejará el 100% de esta luz y lo mismo con el verde y el azul.

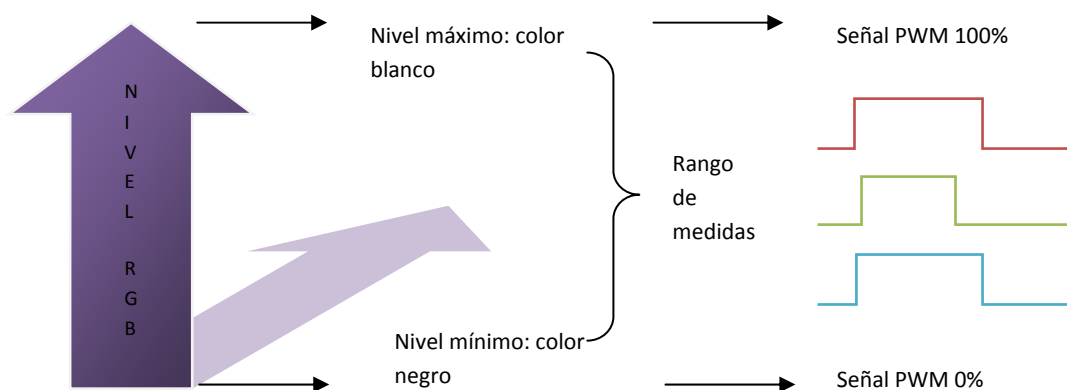
De esta forma se tiene una referencia del máximo de luz que puede devolver un objeto y así poder averiguar cuál es el porcentaje de rojo, verde y azul con una simple regla de proporcionalidad. Una vez hallado ese porcentaje se crea la señal PWM con un ciclo de trabajo de igual proporción.

Al igual que el blanco refleja todos los colores, el negro los absorbe todos. Por lo tanto si se realiza una medida del negro debería darnos una salida de cero en el sensor y en consecuencia una señal PWM cero.

Pero en la realidad no sucede esto, el sensor da una salida mayor que cero, a la que podemos llamar valor de “offset” o valor mínimo. Esto puede deberse a la interferencia de la luz ambiental; se ha intentado aislar tanto a los extremos de la fibra óptica como el sensor, pero aún así sigue llegando algo de luz. Puede que otro motivo sea que la superficie del objeto refleje por sí misma algo de luz, es decir que sea una superficie reflectante.

A estos motivos se les puede sumar muchos otros, pero no son de mucha importancia para el proyecto ya que se simplifican haciendo una calibración del negro cada vez que se quiera iniciar una serie de medidas. Sabiendo cual es el valor de “offset” del sistema se le resta al resto de medidas, evitando así que la medida se vea afectada por este factor.

Por lo tanto para el buen funcionamiento del sistema se debe realizar una calibración del blanco para establecer el nivel máximo y una calibración del negro para eliminar el “offset” del sistema. Esta calibración se puede realizar en cualquier momento, ya que se dispone de dos interruptores que al activarlos realizan la calibración automáticamente, sólo es necesario que la fibra óptica apunte a un objeto blanco o negro en cada caso.



Si se detecta un nivel igual al mínimo el foco permanecerá apagado ya que la señal PWM tendrá un ciclo de trabajo del 0%. Para que quede más visual, se ha decidido que si la medida está fuera de rango (nivel mínimo) el foco parpadee.

Llegados a este punto y viendo que es posible reproducir un color con el sistema ideado, se plantea que el sistema pueda trabajar en diferentes modos.

Un primer modo realiza una medida y reproduce el color hasta que se le da señal de que debe comenzar un nuevo ciclo de medida. Esto se realiza con un pulsador, cada vez que se activa se realiza una nueva medida. Este modo pretende simplemente demostrar que es capaz de reproducir los colores, por lo que se llama modo “demo”.

Sin embargo el segundo modo o modo “burst” realiza medidas constantemente pudiendo reproducir en el foco un barrido de colores, si estos varían a la entrada del sensor.

Los dos modos se diferencian únicamente en la programación, por lo que se detallará el funcionamiento de cada uno en el capítulo 5.

A continuación y para finalizar este capítulo se muestra en la figura 20 un diagrama de bloques del sistema.

En capítulos posteriores se realizará una descripción de cada uno de los bloques que se muestran en este diagrama, detallando su funcionamiento y configuración.

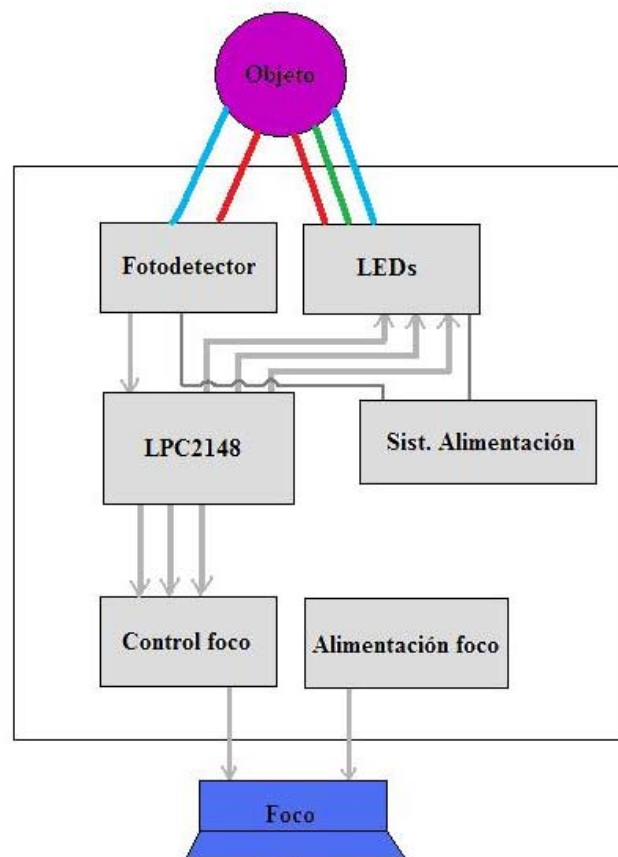


Figura 20 – Diagrama de bloques del sistema

CAPÍTULO 4. DISEÑO HARDWARE.

A continuación se va realizar una exposición del circuito implementado para el diseño del sistema. Para facilitar la comprensión del mismo se ha dividido en diferentes partes y funciones, pero podemos encontrar el esquema eléctrico completo en los anexos del documento.

1. Sistema de iluminación o emisor.

Existen dos sistemas de iluminación en el diseño: los tres LEDs RGB utilizados para medir el color y el foco de LEDs de alta potencia que reproducen el color medido. En esta sección se analiza el circuito de ambos sistemas y se calculan todos los parámetros necesarios.

1.1. Circuito de control de los LEDs.

Como antes se ha indicado la mejor forma de reproducir el color de un objeto es averiguar cuáles son sus niveles de rojo, verde y azul. Para ello iluminaremos el objeto con tres luces de estos colores y mediremos la luz reflejada.

La forma más sencilla es encendiendo y apagando los LEDs de forma secuencial. Es decir, se enciende el LED, se realiza la medida de la luz reflejada, se apaga y se pasa al siguiente LED. El encargado de encenderlos y apagarlos es el microprocesador que, como se detallará en el siguiente capítulo, realiza esta operación varias veces para que el dato final sea lo más fiable posible.

El circuito de control se muestra en la figura 21. El primer elemento que aparece es el LM317. Este componente es un regulador de tensión positivo, puede obtener un voltaje de salida desde 1.2 V a 37 V usando dos resistencias externas. Pero en este caso está configurado como regulador de corriente. La corriente óptima de funcionamiento de los LEDs de alta potencia escogidos es de 350 mA, por lo que se ha regulado esta corriente para que permanezca siempre constante utilizando el LM317. Con esta configuración obtenemos:

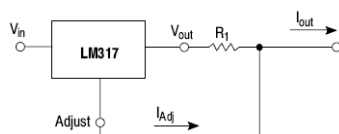


Figura 20 – Regulador de corriente

Si se quiere obtener una intensidad de 350 mA el valor de R1 es:

$$R1 = \frac{1.25V}{I_{out}} = \frac{1.25V}{350mA} = 3.5\Omega \xrightarrow{\text{normalizada}} 3.3\Omega \Rightarrow I_{LED} \approx 379mA$$

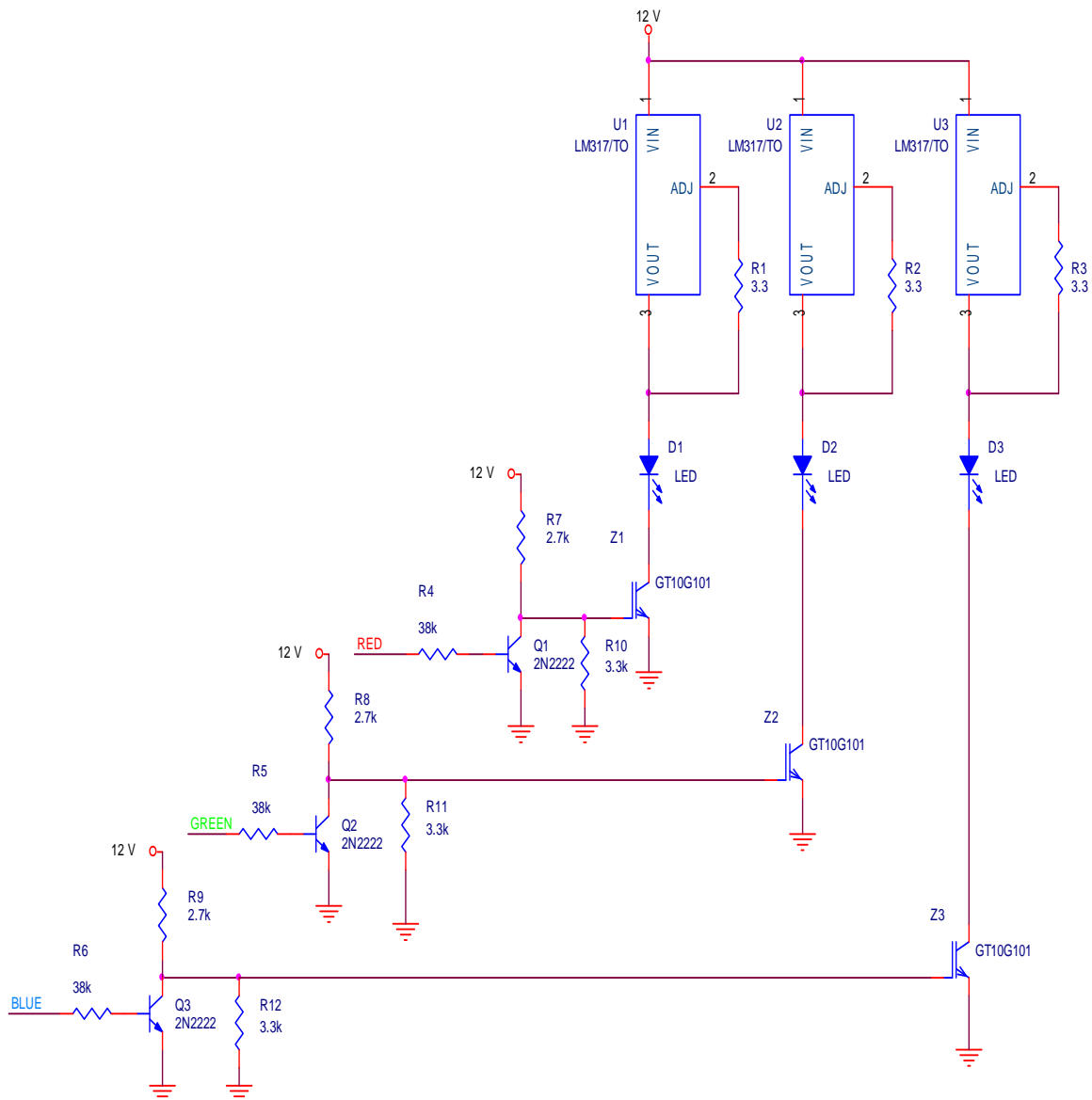


Figura 21 – Circuito de control de los LEDs

Como se puede observar existen tres líneas, llamadas Red, Green y Blue que irán conectadas a los tres puertos de salida del microprocesador. En un principio, cuando el microprocesador diera al puerto un “1” lógico, el transistor IGBT GT10G101 se saturaría dejando pasar toda la corriente, luciendo así el LED. Pero durante el montaje del diseño se observó que el transistor IGBT no se saturaba con los 3.3 V que da la salida del microprocesador. Por ello se introdujo la etapa del transistor 2N2222, que proporciona la tensión de excitación necesaria.

Este transistor trabaja también entre corte y saturación. Cuando a la salida del microprocesador hay un “1” lógico, es decir 3.3 V, el transistor se satura dejando pasar toda la corriente y por lo tanto la tensión a la puerta del IGBT es cero, por lo que permanecerá en corte. Cuando la salida del micro es “0” lógico, el transistor 2N2222 está en corte, la corriente circulará por el divisor de tensión formado por las resistencias 2.7 K y 3.3 K. Por lo tanto la tensión en la puerta del IGBT es de:

$$V_{gate} = 12 \frac{3.3K}{2.7K + 3.3K} = 6.6 V,$$
 tensión suficiente para que sature el IGBT y luzca el LED.

En conclusión, cuando el microprocesador tiene a la salida del puerto un “1” lógico el LED no luce, sin embargo, cuando tiene un “0” lógico luce. Como se verá en el capítulo siguiente, esto afecta directamente a la programación del microprocesador.

Para que el transistor bipolar trabaje entre corte y saturación hay que calcular adecuadamente el resto de resistencias. Una vez que se encuentra en saturación, a partir del valor de la resistencia de colector imponemos una corriente determinada y calculamos la resistencia de base.

1.2. Sistema de control del foco.

En el capítulo anterior se señalaba que el foco tricolor de LEDs funcionaba con tres señales PWM correspondientes a la intensidad luminosa de cada LED, además de las señales de alimentación de 90 V y 0 V y la masa lógica. Este apartado se va a centrar en las señales de control PWM.

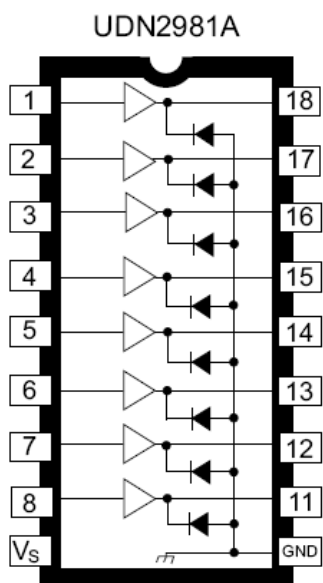


Figura 21 – Driver
UDN2981A

Estas señales son las generadas por el microprocesador después de calcular los niveles de cada color. Pero la señal del micro tiene un valor insuficiente para que funcione el foco. Es necesario un driver, en concreto el UDN2981A.

El UDN2981A es ideal para separar circuitos lógicos de baja corriente de circuitos de corrientes más elevadas. Es capaz de soportar 50 V a la salida y una corriente de 500 mA.

2. Sistema receptor.

Una de las partes más importantes del diseño es el sensor de luz. Él se encargará de transformar el color en una magnitud entendible y fácilmente manejable por la parte de control.

Es necesario un sensor pequeño y con salida directa o fácilmente acoplable a un microprocesador, ya que será éste el que interprete la señal del sensor. Como se ha comentado en el capítulo anterior, el sensor escogido es el APDS-9002. Es un sensor de montaje superficial con una respuesta espectral que alcanza su punto máximo en la curva de luminosidad humana. Su salida es muy lineal a lo largo de un amplio rango de iluminación y tiene una sensibilidad muy alta para pequeños cambios de luz.

Su circuito de acondicionamiento es el mostrado en la figura 22. El sensor puede ser alimentado desde 2.4 V a 5.5 V. Como el resto de los circuitos tienen un voltaje de alimentación de 12 V se utiliza un regulador 7805, con el que conseguimos una salida de 5 V ideal para alimentar el sensor.

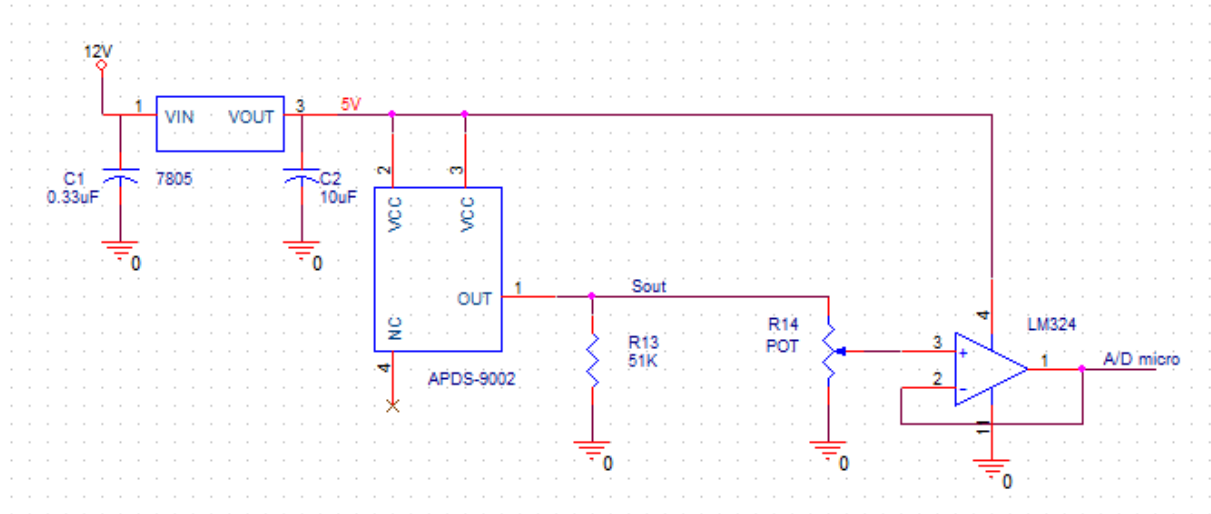


Figura 22 – Circuito de acondicionamiento del fotodetector.

A la salida del sensor se obtiene directamente un voltaje de salida proporcional a la intensidad luminosa detectada. Según sea el valor de la resistencia de salida se obtendrán diferentes voltajes como se puede observar en la figura 23. Cuanto más grande sea la resistencia mayor voltaje de salida se consigue.

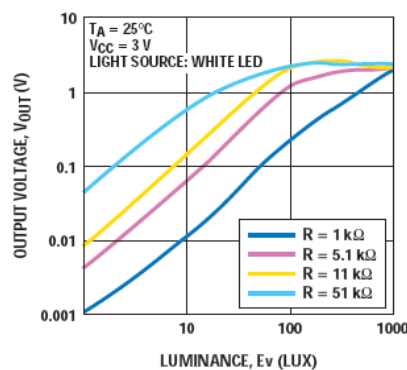


Figura 23 – Voltaje de salida vs. Intensidad luminosa según la resistencia de carga.

El convertidor analógico digital del microprocesador va ser el encargado de transformar este voltaje en información digital. Su rango de entrada es de 0 a 3.3 V pudiendo dañar el sistema cualquier voltaje superior al indicado.

Al realizar diferentes pruebas de la salida del sensor se observó que el voltaje era muchas veces superior a 3.3 V, por lo que podía estropearse el A/D. Para evitar esta situación se ha situado un potenciómetro a la salida del sensor que funciona como un divisor de tensión. Este potenciómetro se ha ajustado experimentalmente para que la tensión de salida del sensor nunca supere los 3.3 V y, además, que la máxima tensión de salida del sensor corresponda a un valor cercano a 3.3 V en la salida del divisor para que el rango de medidas sea lo mayor posible.

Se ha introducido un seguidor de tensión para aislar el microprocesador de todo este circuito de acondicionamiento y acoplar las impedancias de entrada y salida.

3. Alimentación del foco.

Hasta ahora todos los elementos del diseño funcionan con un voltaje de alimentación de 12 V o inferior. Pero el foco tricolor requiere un voltaje de 90 V.

Este voltaje se va a conseguir a través de la tensión de red. Se ha diseñado un circuito rectificador reflejado en la figura 24.

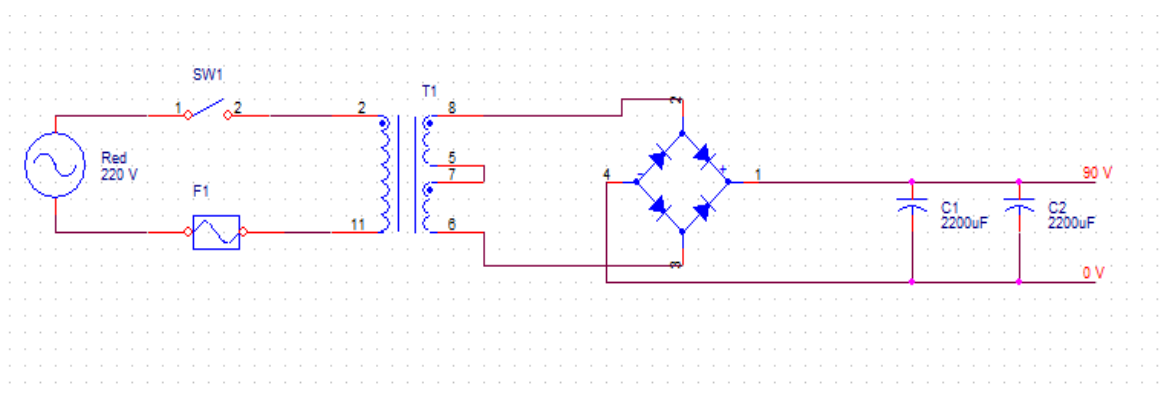


Figura 24 – Circuito de alimentación del foco.

Se ha utilizado un transformador toroidal de relación de transformación 220:35. Si unimos los secundarios obtenemos una tensión de salida de 70 V.

Para rectificar la tensión de salida del transformador se ha utilizado el puente de diodos KBPC5010 y para su posterior filtrado dos condensadores 2200 μF , valor suficiente para que el rizado de la tensión sea insignificante. El voltaje de salida después del rectificador y filtro es de 90 V.

4. Circuito de alimentación del microprocesador.

El microprocesador LPC2148 requiere una alimentación de 3.3 V, por lo que necesitamos regular la tensión de entrada de 12 V. Para ello, se ha utilizado el regulador LM317 configurado como regulador variable de tensión tal y como se muestra en la figura 25. Con el potenciómetro se ajusta la tensión de salida a la deseada.

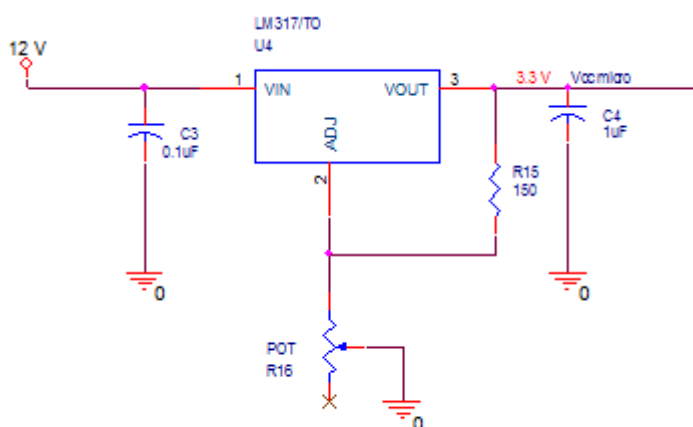


Figura 25 – Circuito de alimentación del microprocesador.

5. Circuito de control por interruptores.

El buen funcionamiento del sistema requiere una calibración dinámica del rango de medida de los colores, es decir, del nivel máximo (color blanco) y mínimo (color negro) de luz que puede dar cada color puro RGB.

Para ello existen dos interruptores, uno para el blanco y otro para el negro, con los que se calibra el sistema al inicio de una serie de medidas y, además, se puede recalibrar en cualquier punto del programa.

A parte de los interruptores de calibración, el sistema consta de dos interruptores más, uno por cada modo de funcionamiento. Como se ha comentado anteriormente, el sistema tiene dos modos de funcionamiento: “demo” y “burst”, en los que se entrará en más detalle en el siguiente capítulo. El usuario decidirá el modo a través de dos interruptores.

Es decir, en total el diseño tiene cuatro interruptores para su manejo. La configuración de los interruptores se muestra en la figura 26.

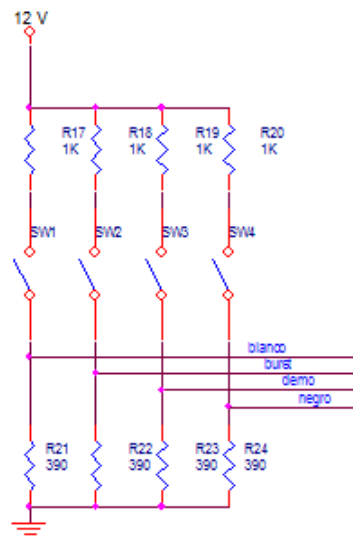


Figura 26 – Circuito de control por interruptores.

Los puertos del microprocesador funcionan de 0 V “cero lógico” a 3.3 V “uno lógico”, por lo que se ha diseñado un divisor de tensión para que la tensión en el puerto de entrada del microprocesador sea 0 V cuando el interruptor este abierto y 3.3 V cuando esté cerrado. De esta forma se puede leer el estado de los interruptores mediante software y así saber que acción quiere realizar el usuario del sistema.



6. Relación de los puertos del microprocesador utilizados.

Al explicar el diseño hardware del sistema se ha indicado la utilización de algunos de los puertos del microprocesador. En la tabla 5 se muestra la función de cada uno de ellos, si son de entrada o salida y el número de pin utilizado.

NÚMERO DEL PIN	FUNCIÓN	I/O
P0.0	Propósito general	Salida-LED rojo
P0.1	Propósito general	Salida-LED verde
P0.4	Propósito general	Salida-LED azul
P0.7	PWM2 (ROJO)	-
P0.21	PWM5 (VERDE)	-
P0.9	PWM6 (AZUL)	-
P0.29	AD0.2	-
P0.10	Propósito general	Entrada-Pulsador(c. Negro)
PO.11	Propósito general	Entrada-Pulsador(c.Blanco)
PO.20	Propósito general	Entrada-Pulsador(demo)
P0.23	Propósito general	Entrada-Interruptor (burst)

Tabla 5 – Puertos del microprocesador utilizados.



CAPÍTULO 5. DISEÑO SOFTWARE.

En este capítulo se va realizar una explicación del programa implementado en el sistema. Como se ha dicho anteriormente, el microprocesador tiene tres funciones: realizar el encendido secuencial de los LEDs, hacer la conversión analógico-digital de las medidas del sensor y operar estas medidas para generar las señales PWM que controlan el foco tricolor.

Además debe realizar una lectura continua del estado de los pulsadores e interruptor para saber qué función debe realizar en cada momento. Como se ha dicho anteriormente, el sistema tiene tres pulsadores, dos para la calibración del negro y del blanco y uno para elegir el modo de funcionamiento “demo” del sistema, y un interruptor para el modo “burst”. Según la función escogida el programa se desarrollará de forma diferente. Por lo tanto se debe realizar una lectura de ellos al inicio de cada ciclo del programa.

Para hacer más sencilla la lectura y facilitar la comprensión se van a explicar por separado cada una de estas funciones. Pero antes, se va a explicar cuales son los parámetros de inicialización del microprocesador.

1. Inicialización del microprocesador.

El microprocesador LPC2148 consta de numerosos recursos como se indicó en el segundo capítulo. Pero para este diseño sólo se utilizan el timer0, el convertidor analógico-digital y el generador de PWM. Para el correcto uso de los periféricos es necesario inicializarlos a los valores adecuados para nuestro sistema.

En primer lugar se deben inicializar los puertos. El microprocesador utiliza los puertos de propósito general como entrada y salida de los periféricos, por lo que es necesario indicar cual va ser la función de cada uno de los puertos. Esto se realiza con los siguientes registros:

- PINSEL0 (0xE002 C000): Puerto 0 – pines 0..15
- PINSEL1 (0xE002 C004): Puerto 0 – pines 16..31
- PINSEL2 (0xE002 C014): Puerto 1 – pines 16..31



Cada uno de estos registros de 32 bits tiene asignado dos bits por cada pin del puerto correspondiente con los cuales se escoge la función. Como cada registro sirve para configurar 15 pines es aconsejable utilizar máscaras cada vez que se utilicen estos registros ya que de esta forma nos aseguramos que estemos configurando el pin deseado sin desconfigurar el resto.

Otro registro utilizado es el IOODIR para configurar la dirección individual de cada uno de los pines (0 – entrada, 1 – salida). Este registro se utiliza para indicar si son de lectura o de escritura los pines cuya función es de propósito general. En este diseño existen siete pines de propósito general: los tres de encendido de los LEDs (salida - escritura) y los cuatro de los interruptores (entrada - lectura). Finalmente se utiliza el registro IOOSET para inicializar todas las salidas a 1.

En la tabla 5 vista en el capítulo anterior se recogía los pines utilizados y la función de cada uno de ellos. De esa tabla se obtiene la siguiente inicialización:

```
// INICIALIZACION PUERTOS
```

```
PINSEL0|=0X00000000; // P0.0 --> P0.15 como GPIO  
PINSEL1|=0X04000000; // P0.29 AIN2 ( A/D)  
PINSEL0|=0X00088000; // P0.9 Y P0.7 PWM6 Y PWM2  
PINSEL1|=0X00000400; //P0.21 PWM5  
IOODIR|=0x0000001F; // P0.0 P0.1 P0.4 como salida y P0.10 P0.11 P0.20 y P0.23  
como entrada  
IOOSET|=0xFFFFFFFF; // Inicializa las salidas a UNO
```

Una vez inicializado los puertos se deben inicializar los periféricos a los valores deseados. Por ejemplo, el convertidor analógico digital se va configurar en el canal 2 (pin P0.29) como un A/D de 10 bits, por lo que tendremos 1024 niveles de conversión, a una frecuencia de conversión de 3MHz (suficiente para nuestra aplicación).

El A/D tiene dos modos de funcionamiento, uno controlado por software y el otro modo burst. Con el primero se inicia la conversión por software y solo se realiza una y finaliza. En el otro modo se realizan múltiples conversiones de uno o varios canales siendo más complicado su manejo. Para el diseño se utilizará el primer modo de funcionamiento ya que es más sencillo y cumple con todas las exigencias. El registro utilizado para su inicialización es el siguiente:



```
// INICIALIZACIÓN A/D  
ADCR=0x00200604; // AD0.2 10 bits 3MHZ
```

Otro periférico que hay que configurar es el TIMER0. Como se verá más adelante, según el modo de funcionamiento escogido por el usuario (calibrado-demo-burst) los LEDs estarán encendidos más o menos tiempo, por lo que se ha escogido una base de tiempos adecuada para todos estos modos, un milisegundo. Además se ha habilitado la interrupción del TIMER y se ha ordenado el reset del mismo al producirse la interrupción.

El TIMER tiene también dos modos de funcionamiento:

- Capture: se trata de capturar el valor del contador TIMER en el instante de ocurrir un evento externo, y guardarlo en un registro CRO.
- Match: se trata de generar un evento, al pasar el contador del TIMER por el valor previamente almacenado en un registro MRO.

El modo que se ajusta a las especificaciones del sistema es el segundo, ya que lo que se quiere es contar un milisegundo. Por lo tanto hay que almacenar un valor en el registro MRO para que el TIMER cuente 1ms. Para ello hay que tener en cuenta que la frecuencia del microprocesador es de 15 MHz.

$$ValorMRO = \frac{1ms}{15MHz^{-1}} = 15000 = 3A98_H$$

La inicialización es la siguiente:

```
// INICIALIZACION TIMER 0
```

```
TOTCR=0x00000002; // reset timer  
TOPR=0x00000000; // prescaler no utilizado  
TOMCR=0x00000003; //interrupcion y reset  
TOMRO=0x00003A98; // 1 ms
```

```
VICVectAddr7= (unsigned) T0_RAI; // inicialización vector RAI  
VICVectCntl7=0x00000024; // timer 0 canal 4(asignación del canal de  
interrupción)  
VICIntEnable|=0x00000010; // habilita interrupción timer
```

Finalmente se configura el modulador de anchura de pulso (PWM). Este funciona igual que un TIMER. El microprocesador permite controlar la señal PWM por un flanco o



por dos. Para el caso que se ocupa no es necesario controlar dos flancos de la señal PWM, por lo tanto se escoge el primer modo de funcionamiento ya que la programación es más sencilla.

Con los registro PWMMRO se determina el periodo de la señal tras el cual el TIMER se resetea. Al resetearse el TIMER, todas las salidas de PWM sufrirán un flanco de subida. El ciclo de trabajo de cada señal viene dado por cada registro MRx, pero este valor es el que debe calcular el microprocesador basándose en las medidas realizadas de los colores. Más adelante se explicará cual es el algoritmo para obtener este valor.

La inicialización es la siguiente:

```
// INICIALIZACION PWM
```

```
PWMPR=0X00000002; // preescalado  
PWMPCR=0X00006400; // SINGLE EDGE y habilitadas las salidas  
PWMMCR=0X00000002; //RESET  
PWMMR0=4999; // PERIODO DE 1khz
```

2. Programa principal.

Como se ha dicho antes, el programa está continuamente leyendo los pulsadores e interruptor, si uno de ellos se cierra el programa se dirige al modo de funcionamiento correspondiente, ejecutando el código que se describirá en los siguientes apartados.

El diagrama de flujo del programa principal es el que se muestra en la figura 27.

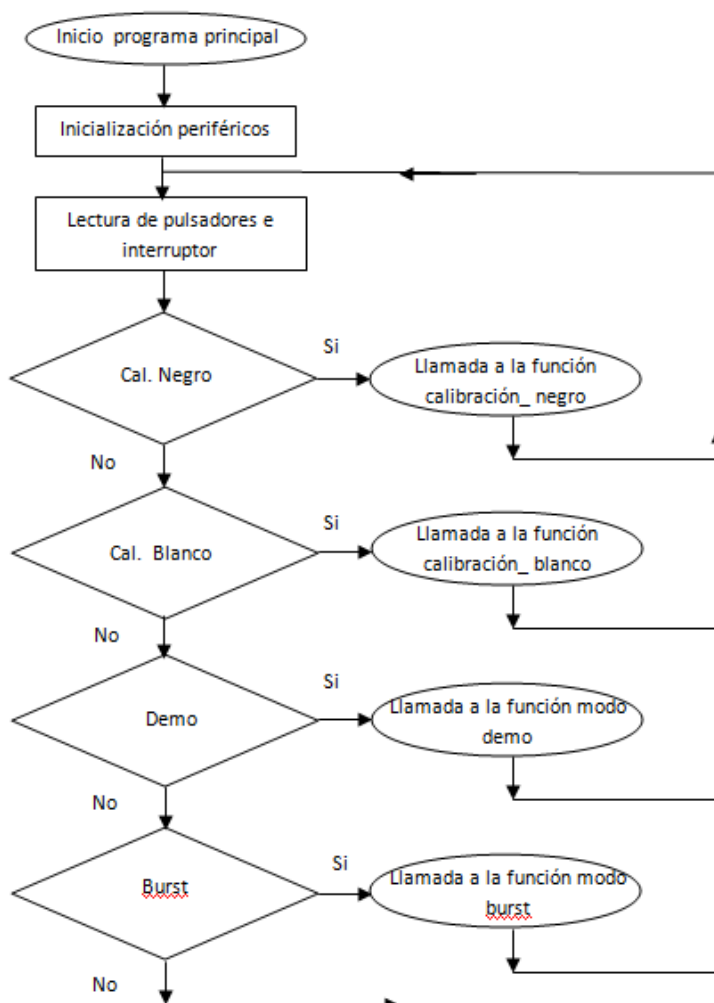


Figura 27 – Diagrama de flujo del programa principal.

3. Programa de calibración.

Para reproducir los colores el sistema se mide el nivel de rojo, verde y azul que refleja el objeto al iluminarlo con estos tres colores. Pero para obtener el nivel debe establecerse un máximo y un mínimo.

Tras el estudio de colorimetría se ha determinado que el color blanco refleja el máximo nivel de luz de los tres colores y que a su vez el negro refleja el mínimo. Pero esta afirmación no es únicamente teórica. Durante el diseño del sistema se han realizado múltiples medidas para respaldar esta teoría siendo siempre el resultado positivo: ningún color reflejaba más luz que el blanco y ningún color reflejaba menos luz que el negro.

Por lo tanto, se pueden establecer el blanco y el negro como referentes del sistema.

Como antes se ha comentado, se puede realizar la calibración del sistema en cualquier momento a través de dos pulsadores, uno por cada color.

Los dos programas de calibración son idénticos. Se realiza el encendido secuencial de los LEDs siendo el orden rojo, verde y azul. Para que la medida sea fiable se realizan treinta medidas estando encendido cada LED.

La secuencia es la siguiente: se activa el TIMER y se enciende cada LED durante 300 ms. Durante estos 300 ms se han realizado 30 conversiones, por lo tanto, cada 10 ms se arranca el convertidor analógico-digital, siendo así la frecuencia de muestreo 100Hz. Al cabo de 900 ms se ha obtenido 30 medidas de cada color.

Para que el circuito de control de los LEDs no se caliente demasiado se fuerza a que todos los LEDs permanezcan apagados un periodo de tiempo razonable antes de empezar un nuevo ciclo de medida. Se pensó que si cada LED permanecía solamente encendido un quinto del tiempo total del ciclo de medida el circuito no se calentaría, lo cual es cierto. Por lo tanto, si cada LED permanece encendido 300 ms el tiempo total del ciclo es de 1,5s. En la figura 28 se representa un ciclo de medida.

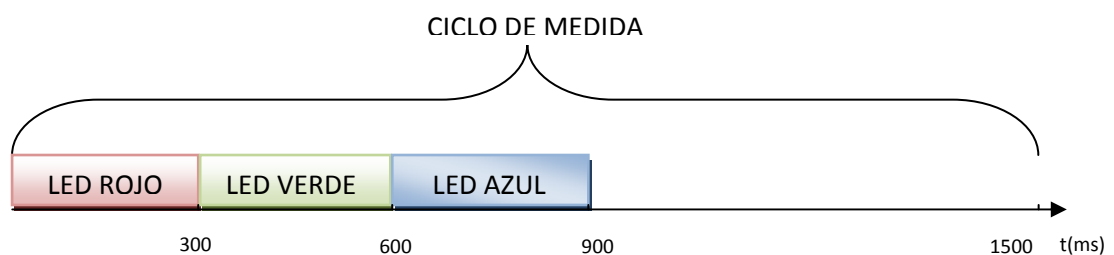


Figura 28 – Representación de un ciclo de calibración.

Todas las medidas realizadas son almacenadas en un vector llamado medidas. Las medidas se van almacenando por cada ciclo sabiendo que las 30 primeras corresponden con el nivel de rojo, las 30 siguientes con el nivel de verde y las 30 últimas con el nivel de azul.

De esta forma se realiza una media de los tres niveles y se almacena cada resultado en una variable según en qué calibración estemos. Estas variables son blanco1

(nivel rojo), blanco2 (nivel verde), blanco3 (nivel azul) en el caso de la calibración del blanco y negro1, negro2 y negro3 en el caso de la calibración del negro.

Después de ejecutar estos programas se tienen las referencias necesarias para poder reproducir los colores. El diagrama de flujo correspondiente al programa de calibración es el que se muestra en la figura 29.

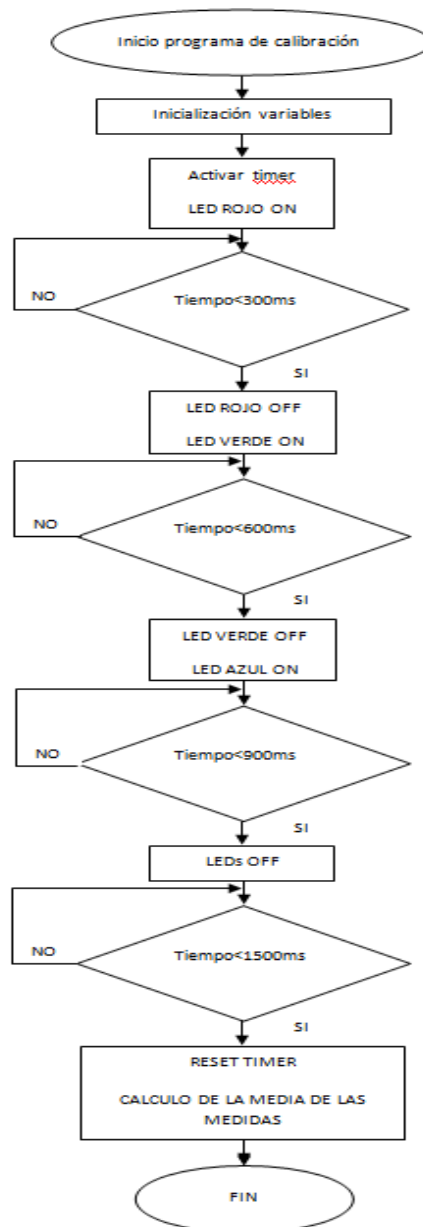


Figura 29 – Diagrama de flujo del programa de calibración.



4. Programa de demostración “demo”.

Uno de los modos de funcionamiento del sistema es el de demostración o “demo”. Al ejecutar este programa se mide el color y se reproduce a través del foco tricolor, manteniéndolo hasta que se pulse de nuevo otro interruptor. Es decir, sólo realiza una medida.

Además de medir los niveles de rojo, verde y azul del color como ya se ha hecho en el programa de calibración, hay que generar las tres señales PWM correspondientes a los colores RGB para reproducir el color.

El código para medir los niveles RGB del color es igual que el del programa de calibración, cada LED está encendido 300 ms durante los cuales se realizan 30 medidas, es decir, la frecuencia de muestreo sigue siendo 100 Hz. Las medidas realizadas son también almacenadas en el vector “medidas”. Una vez realizadas hay que procesar los datos para que se conviertan en información útil para el control del foco. Para ello se ha creado una función llamada PWM.

El diagrama de flujo del modo “demo” es muy parecido al de calibración, con la diferencia que en lugar de calcular la media llama a la función PWM, por lo que no se ha creído necesario repetir de nuevo el diagrama.

5. Programa de generación de la señal PWM.

La primera operación que realiza esta función es la media de las medidas realizadas que almacena en tres variables: resultado1 (rojo), resultado2 (verde) y resultado3 (azul).

Hasta ahora se sabe que los niveles obtenidos en la calibración del blanco son el máximo de luz que puede reflejar un objeto, por lo tanto estos niveles corresponden a tres señales PWM con un ciclo de trabajo del 100%. Al igual, los niveles obtenidos en la calibración del negro son los mínimos y que suponen un offset del sistema que no se debe considerar, por lo tanto corresponden a tres señales PWM con un ciclo de trabajo del 0%.

Con estos datos podemos conocer el ciclo de trabajo de las señales PWM de cualquier color realizando dos simples operaciones.

Una vez obtenido el nivel RGB del color almacenado en resultadoX sólo hay que restarle el offset del sistema o nivel mínimo, almacenado en negroX y realizar una simple regla de proporcionalidad con el nivel máximo almacenado en blancoX.

$$\text{Ciclo de trabajo PWM} = (\text{resultadoX} - \text{negroX}) \frac{\text{blancoX}}{100}$$

Si el ciclo de trabajo es mayor que el 90% se forzará a que sea igual a 90% para evitar desbordamientos. Y si es menor que el 10% se desprecia la medida tomando un ciclo de trabajo del 10%.

Una vez obtenido los ciclos de trabajo de las señales PWM (una por cada color RGB) se le pasa el valor a los registros PWMMRx que son los encargados de forzar el flanco de bajada de la señal PWM, obteniendo así el ciclo de trabajo deseado. Si el ciclo de trabajo es cero se provocará un parpadeo en el foco para que resulte más visual. El diagrama de flujo es el que se muestra en la figura 29.

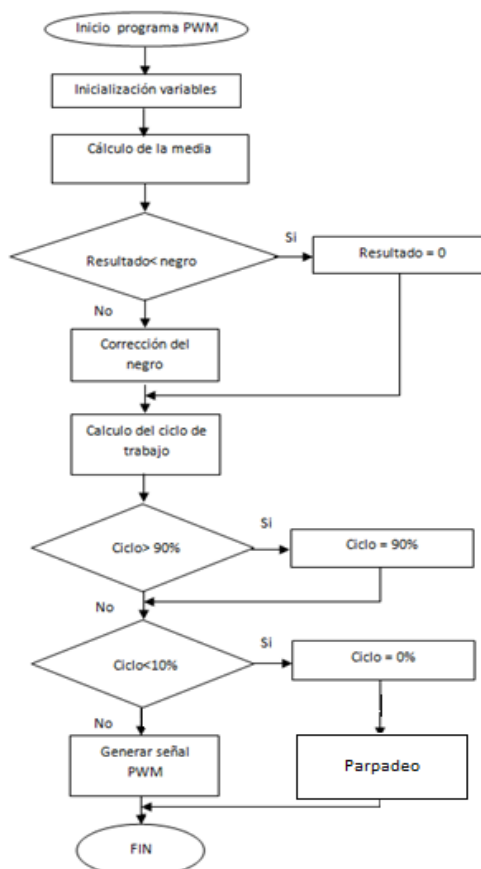


Figura 29 – Diagrama de flujo del programa PWM

6. Programa de barrido o “burst”.

El tiempo de integración del ojo humano entre imagen e imagen es de 50 ms, es decir, que si el tiempo transcurrido entre imagen e imagen es menor, el ojo humano no percibe el cambio de imagen a imagen, lo ve todo continuo.

La frecuencia de cuadro es el número de imágenes transmitidas por segundo. En cine, el número de fotogramas por segundo es 24 y en Televisión debe ser un número similar, de forma que el tiempo transcurrido entre imagen e imagen se encuentre dentro del tiempo de integración temporal del ojo.

El modo “burst” se ideó precisamente para aumentar la frecuencia de cuadro y situarla cercana a la frecuencia de integración del ojo humano dentro de las posibilidades del sistema. El programa es igual que el de modo “demo” pero reduciendo los tiempos y la frecuencia de medida.

Cada LED está encendido durante 20 ms y se realiza una medida cada 1 ms, siendo por lo tanto la frecuencia de muestreo 1 KHz. El tiempo de encendido de los LEDs no es menor ya que se comprobó experimentalmente que al disminuirlo el número de medidas no era suficiente para que la media final fuera un dato fiable. Además hay que tener en cuenta de que el sistema tiene una inercia al cambiar de un color a otro, por lo que si se disminuye demasiado el tiempo no se estarán tomando las medidas correctas.

Por lo tanto, se ha conseguido que la frecuencia de cuadro del sistema sea de 12,5 Hz, la mitad que la frecuencia de integración del ojo humano. En la figura 30 viene representado un ciclo de medida del este modo.

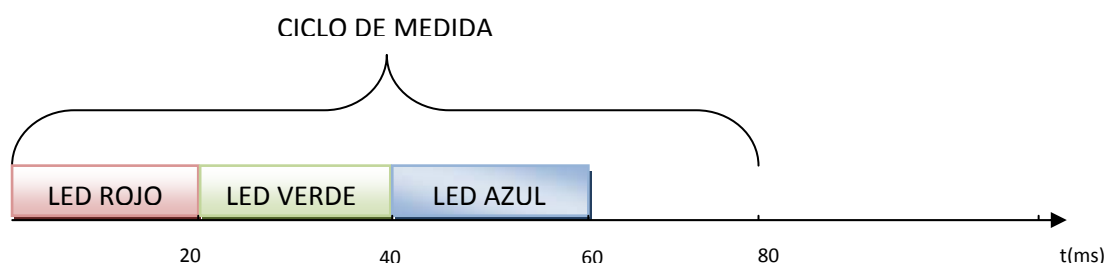


Figura 30 – Representación de un ciclo de medida del modo burst.

El diagrama de flujo es muy parecido al de calibración pero cambian los tiempos y, al igual que en el modo “demo”, no se realiza la media si no que se llama a la función PWM descrita anteriormente. En la figura 31 viene representado.

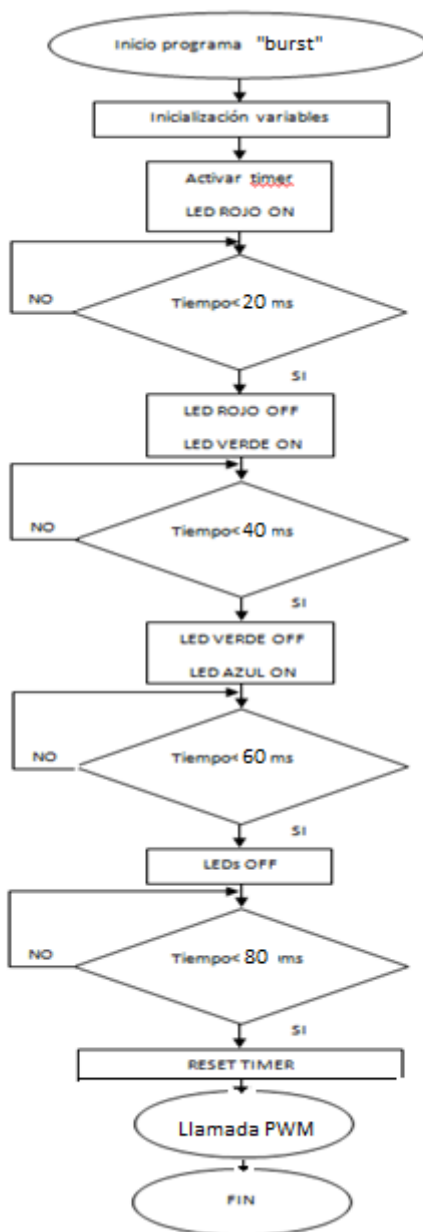


Figura 31– Diagrama de flujo del programa “burst”.

7. Programa de interrupción del timer.

Para finalizar este capítulo se va a mostrar el diagrama de flujo de la interrupción del timer. El timer se encarga de controlar el tiempo de encendido de los LEDs a través de la variable tiempo y de arrancar las conversiones A/D según el modo de funcionamiento. En la figura 32 se muestra el funcionamiento del mismo.

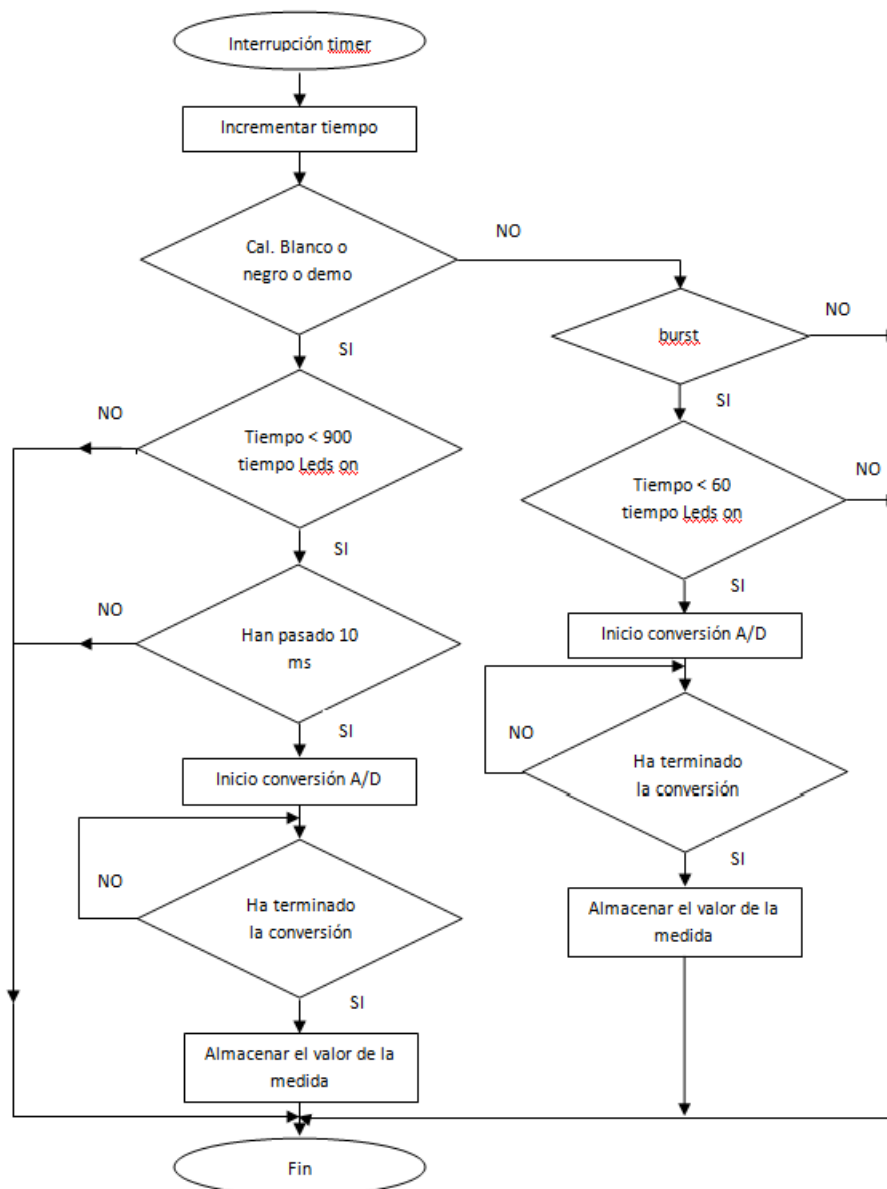


Figura 32 – Diagrama de flujo del programa de interrupción del timer.



CAPÍTULO 6. DISEÑO MECÁNICO.

Se ha diseñado el proyecto con el fin de poder ser trasladado y utilizado en cualquier sitio que exista una toma de red. Para ello es necesario un soporte donde poder mover el sistema sin que sufra ningún desperfecto y los componentes necesarios para alimentar el diseño con la tensión de red. En el presente capítulo se explica cual es el diseño mecánico del proyecto empleado.

La primera decisión tomada respecto al diseño fue separar los circuitos de control del circuito de potencia de alimentación del foco. En los circuitos de control se trabaja con tensiones de 12 voltios o inferiores, mientras que el circuito de potencia rectifica la tensión de red para obtener una tensión de 90 voltios y de esta forma separábamos mecánicamente los dos circuitos. Por lo tanto, el sistema está formado por dos cajas: una de alimentación del foco y otra de control, y el foco tricolor. Cada caja es de 250x200x65 mm. A continuación se van a analizar el diseño de cada caja por separado.

1. Caja de control.

En la caja de control se encuentra los LEDs con lo que se ilumina el objeto, el sensor APDS-9002, el microprocesador, la fibra óptica, el circuito de control de los LEDs y el de control del foco. En la figura 34 se puede ver una imagen de la disposición de todos estos elementos.

El sensor APDS-9002 está montado sobre la placa del microprocesador. Como se puede observar en la imagen la placa de LEDs está junto a la placa del microprocesador para facilitar la disposición de los cuatro hilos de fibra óptica.

Uno de los problemas mecánicos más importantes durante el desarrollo del diseño fue fijar la fibra óptica a los LEDs y al sensor. Existen algunos soportes para fijar la fibra pero ninguno era válido para este diseño. Además, el uso del sistema requiere mover la fibra óptica para medir el color de diferentes objetos, por lo que uno de los extremos de la fibra debe estar libre, mientras que el otro debe estar fijo y lo más perpendicular posible al LED o al sensor.

La solución fue idear un soporte robusto en uno de los extremos que mantuviera la fibra óptica lo más cerca posible a 90 grados.

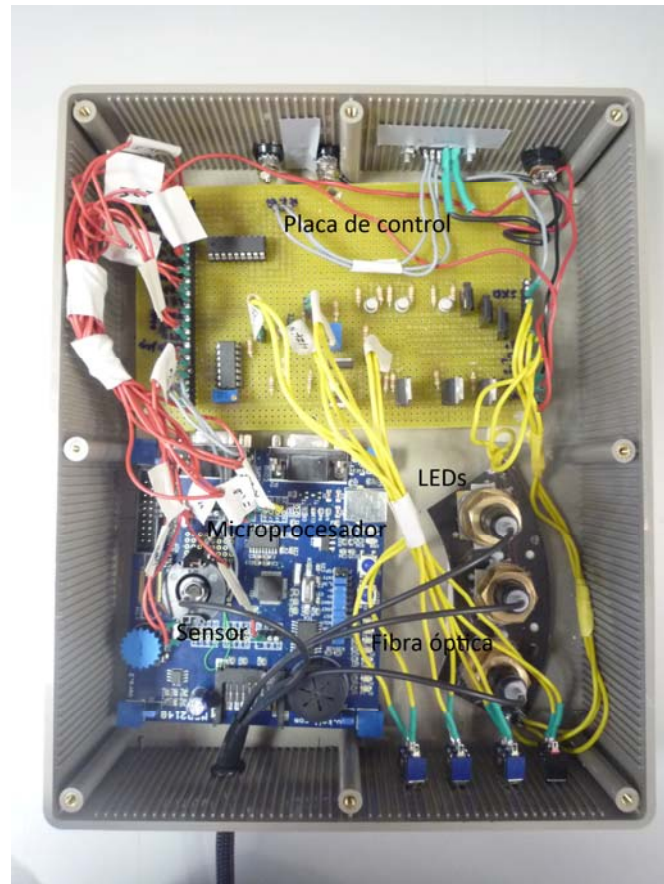


Figura 34 – Caja de control

Se han utilizado materiales disponibles en el laboratorio como tuercas y anillas. El resultado final se muestra en la figura 35.



Figura 35 – Soporte de la fibra óptica.

Para facilitar el manejo de la fibra óptica se han introducido los cuatro hilos en una manguera flexible. En el extremo final de la fibra, por el que se iluminará el objeto con los tres colores y se recogerá la luz reflejada se ha colocado un capuchón para aislar a las fibras de la luz ambiente y facilitar la transmisión de la luz reflejada. En la figura 36 se puede ver el aspecto final de la fibra.

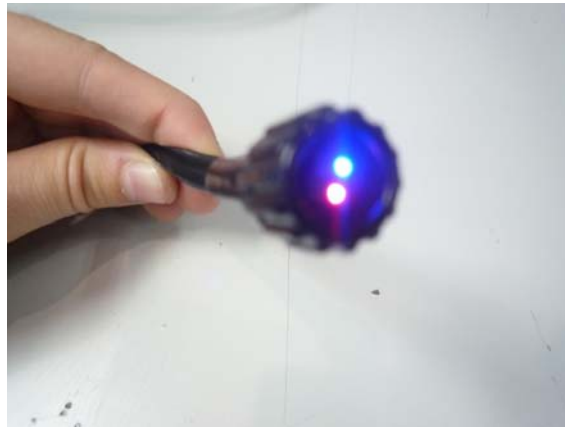


Figura 36 – Extremo final fibra óptica.

En la figura 37 se puede ver una imagen del panel frontal de la caja de control. Para facilitar el manejo al usuario se han colocado aquí los cuatro interruptores de control y la manguera flexible de las fibras ópticas.



Figura 37 – Panel frontal caja de control.

El panel posterior es el que se muestra en la figura 38. Podemos encontrar la señal de alimentación del circuito de control, el conector del foco y las señales de alimentación del foco.



Figura 38 – Panel posterior caja de control.

Como se ha dicho anteriormente, el circuito de control trabaja a 12 voltios. Para conseguir esta tensión directamente de la red se ha escogido una fuente de alimentación externa de 12 voltios de tensión y 1.5 amperios de intensidad.



El conector de la fuente es un RCA Jack macho, por lo tanto la caja tiene un conector de panel RCA Jack hembra.

Figura 39 – Fuente de alimentación externa

El foco tricolor necesita 6 señales para su funcionamiento, dos de alimentación de 90 y 0 voltios, las tres señales PWM y la masa del circuito de control. Para facilitar la conexión del foco se ha utilizado un conector delta 9.

1. Señal de alimentación 90 V.
2. Señal de alimentación 0 V.
3. PWM azul.
4. PWM verde.
5. PWM rojo.
6. GROUND.
7. 8. 9. Sin conectar.

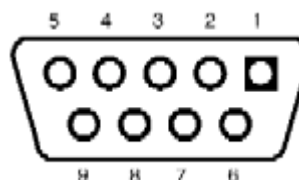


Figura 36 – Conector delta 9 hembra.

Como las señales de alimentación del foco están en el mismo conector que las de control, hay dos conectores más de banana hembra en el frontal de la caja de control para traer la señal de alimentación del foco de la otra caja.

2. Caja de alimentación del foco.

En esta caja se encuentra el circuito de potencia para la alimentación del foco. En la figura 40 se ve cual es la disposición de todos los elementos en la caja.

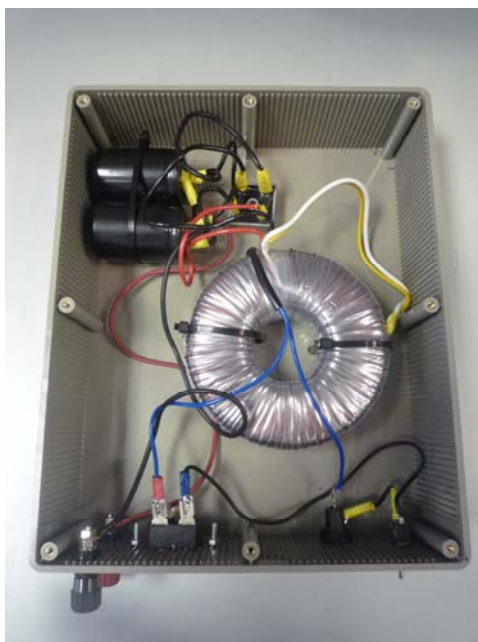


Figura 40 – Caja de alimentación del foco.

Los conectores externos se encuentran todos en el panel posterior de la caja (figura 41). Para la tensión de red se ha utilizado un conector IEC como el que se muestra en la imagen. También hay un interruptor para abrir y cerrar el circuito, un fusible y los conectores banana hembra para trasladar los 90 voltios a la otra caja.



Figura 41 – Panel posterior caja de alimentación del foco.



CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

1. *Gama de colores reproducible.*

Llegado este punto es importante averiguar cuáles son las limitaciones del sistema, es decir, que gama de colores es capaz de reconocer y de reproducir.

En el capítulo dos se indicaba que existen diferentes tipos de colores: cromáticos, que se distinguen por su tinte y saturación, mezclas de rojo, verde y azul, y acromáticos que se diferencian por su brillo o luminancia, como son el blanco, el negro y la escala de grises. Como se ha visto a lo largo del documento, el diseño mide únicamente los niveles de rojo, verde y azul de un color, por lo tanto, sólo será capaz de distinguir y reproducir colores cromáticos.

La siguiente pregunta que surge es dentro de los colores cromáticos cuáles es capaz de reconocer.

Para averiguarlo es necesario determinar el color de los LEDs. Los utilizados para analizar la luz reflejada por el objeto son los mismos que los que están integrados en el foco tricolor, por lo tanto se realiza el mismo análisis para todos.

Como se ha visto en el segundo capítulo, una fuente de luz está representada en el plano o carta de colores por un punto colorimétrico xy , de cromaticidad fija y luminancia variable. Si se averigua el punto xy de cada uno de los LEDs y se sitúan sobre la carta CIE se forma un triángulo que abarca los colores que es capaz de reproducir el sistema conociendo así el alcance del mismo.

El primer paso para calcular es conocer el espectro de emisión de los LEDs. En la figura 39 vienen representados los espectros de la gama de LEDs LUXEON K2 utilizados. Los colores corresponden al red (rojo), green (verde) y blue (azul). Como se puede observar los LEDs emiten varias componentes espectrales de diversa potencia emisiva.

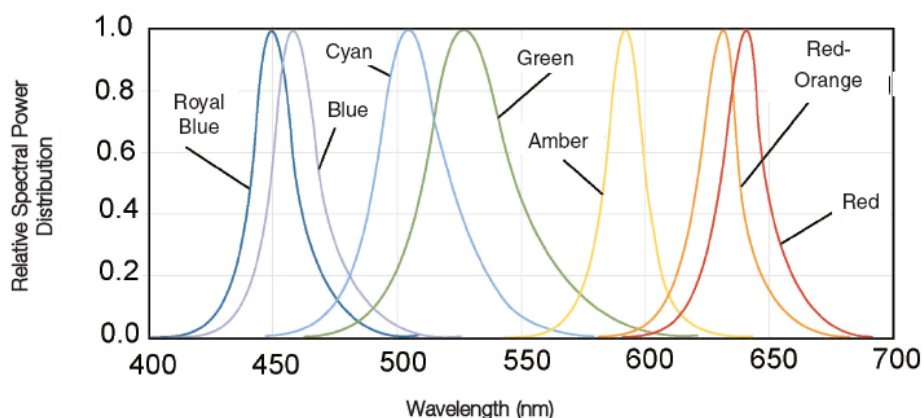


Figura 39 – Espectro de los LEDs de alta potencia utilizados.

Una vez obtenido el espectro de emisión hay que calcular las coordenadas de cada color. Los fundamentos teóricos son los siguientes:

Dado n colores con diferentes longitudes de onda C_1, C_2, \dots, C_n con componentes $(X_1, Y_1, Z_1), \dots, (X_n, Y_n, Z_n)$ las coordenadas absolutas de la mezcla de los n es:

$$X = \sum X_i \quad Y = \sum Y_i \quad Z = \sum Z_i$$

Las coordenadas relativas xyz , que son con las que se trabaja sobre la carta CIE, se consiguen de la siguiente forma:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Pero esta relación se cumple sólo cuando los colores son espectralmente puros, y, como se ha visto antes, los LEDs emiten con varias componentes espectrales a diferente potencia.

Por lo tanto se calculan las coordenadas absolutas ponderadas multiplicando cada coordenada por el coeficiente relativo de potencia.

$$X = \sum P_i X_i \quad Y = \sum P_i Y_i \quad Z = \sum P_i Z_i$$

Una vez calculadas las coordenadas absolutas ponderadas se calculan las relativas de la misma forma, obteniendo así el punto sobre la carta CIE.

Este es el procedimiento riguroso para calcular las coordenadas de colores espectralmente puros como los del sistema. Pero se puede observar que al calcular las coordenadas ponderadas el término con mayor peso del sumatorio es el de la longitud de onda que alcanza el máximo de potencia. Además si se observa de nuevo la figura 39 se puede ver que el espectro de los LEDs es estrecho, por lo que los coeficientes relativos de potencia disminuyen más rápido al alejarse del punto máximo.

Por todo ello, se va a realizar una aproximación. Se va a considerar los colores espectralmente puros, cogiendo como única componente la longitud de onda con mayor potencia. En el caso del LED rojo es la componente de 630 nm, en el del verde de 530 nm y en el azul 470 nm.

Se ha comprobado al observar diferentes estudios de LEDs, que la diferencia entre considerar todas las componentes espectrales y considerar únicamente la de mayor potencia es muy pequeña.

Por lo tanto, para obtener las coordenadas de los LEDs sólo hay que fijarse en la tabla 6 que recoge los valores de las coordenadas relativas de los colores espectrales puros según la longitud de onda.

Wave-length in nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	Wave-length in nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0.1741	0.0050	0.8209	440	0.1644	0.0109	0.8247
385	0.1740	0.0050	0.8210	445	0.1611	0.0138	0.8251
390	0.1738	0.0049	0.8213	450	0.1566	0.0177	0.8257
395	0.1736	0.0049	0.8215	455	0.1510	0.0227	0.8263
400	0.1733	0.0048	0.8219	460	0.1440	0.0297	0.8263
405	0.1730	0.0048	0.8222	465	0.1355	0.0399	0.8246
410	0.1726	0.0048	0.8226	470	0.1241	0.0578	0.8181
415	0.1721	0.0048	0.8231	475	0.1096	0.0868	0.8036
420	0.1714	0.0051	0.8235	480	0.0913	0.1327	0.7760
425	0.1703	0.0058	0.8239	485	0.0687	0.2007	0.7306
430	0.1689	0.0069	0.8242	490	0.0454	0.2950	0.6596
435	0.1669	0.0086	0.8245	495	0.0235	0.4127	0.5638

Wave-length in nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	Wave-length in nm	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
500	0.0082	0.5384	0.4534	645	0.7230	0.2770	0.0000
505	0.0039	0.6548	0.3413	650	0.7260	0.2740	0.0000
510	0.0139	0.7502	0.2359	655	0.7283	0.2717	0.0000
515	0.0389	0.8120	0.1491	660	0.7300	0.2700	0.0000
520	0.0743	0.8338	0.0919	665	0.7311	0.2689	0.0000
525	0.1142	0.8262	0.0596	670	0.7320	0.2680	0.0000
530	0.1547	0.8059	0.0394	675	0.7327	0.2673	0.0000
535	0.1929	0.7816	0.0255	680	0.7334	0.2666	0.0000
540	0.2296	0.7543	0.0161	685	0.7340	0.2660	0.0000
545	0.2658	0.7243	0.0099	690	0.7344	0.2656	0.0000
550	0.3016	0.6923	0.0061	695	0.7346	0.2654	0.0000
555	0.3373	0.6589	0.0038	700	0.7347	0.2653	0.0000
560	0.3731	0.6245	0.0024	705	0.7347	0.2653	0.0000
565	0.4087	0.5796	0.0017	710	0.7347	0.2653	0.0000
570	0.4441	0.5547	0.0012	715	0.7347	0.2653	0.0000
575	0.4788	0.5202	0.0010	720	0.7347	0.2653	0.0000
580	0.5125	0.4866	0.0009	725	0.7347	0.2653	0.0000
585	0.5448	0.4544	0.0008	730	0.7347	0.2653	0.0000
590	0.5752	0.4242	0.0006	735	0.7347	0.2653	0.0000
595	0.6029	0.3965	0.0006	740	0.7347	0.2653	0.0000
600	0.6270	0.3725	0.0005	745	0.7347	0.2653	0.0000
605	0.6482	0.3514	0.0004	750	0.7347	0.2653	0.0000
610	0.6658	0.3340	0.0002	755	0.7347	0.2653	0.0000
615	0.6801	0.3197	0.0002	760	0.7347	0.2653	0.0000
620	0.6915	0.3083	0.0002	765	0.7347	0.2653	0.0000
625	0.7006	0.2993	0.0001	770	0.7347	0.2653	0.0000
630	0.7079	0.2920	0.0001	775	0.7347	0.2653	0.0000
635	0.7140	0.2859	0.0001	780	0.7347	0.2653	0.0000
640	0.7190	0.2809	0.0001				

Tabla 6 – Coordenadas xyz de los colores espectrales puros.

Las coordenadas xyz de los LEDs son:

LED	x	Y	Z
Rojo ($\lambda=630$)	0.7079	0.2920	0.0001
Verde ($\lambda=530$)	0.1547	0.8059	0.0394
Azul ($\lambda=470$)	0.1241	0.0578	0.8181

Tabla 6 – Coordenadas xyz de los Leds de alta potencia.

Una vez halladas, sólo queda situarlas sobre la carta CIE y ver el triángulo que forman.

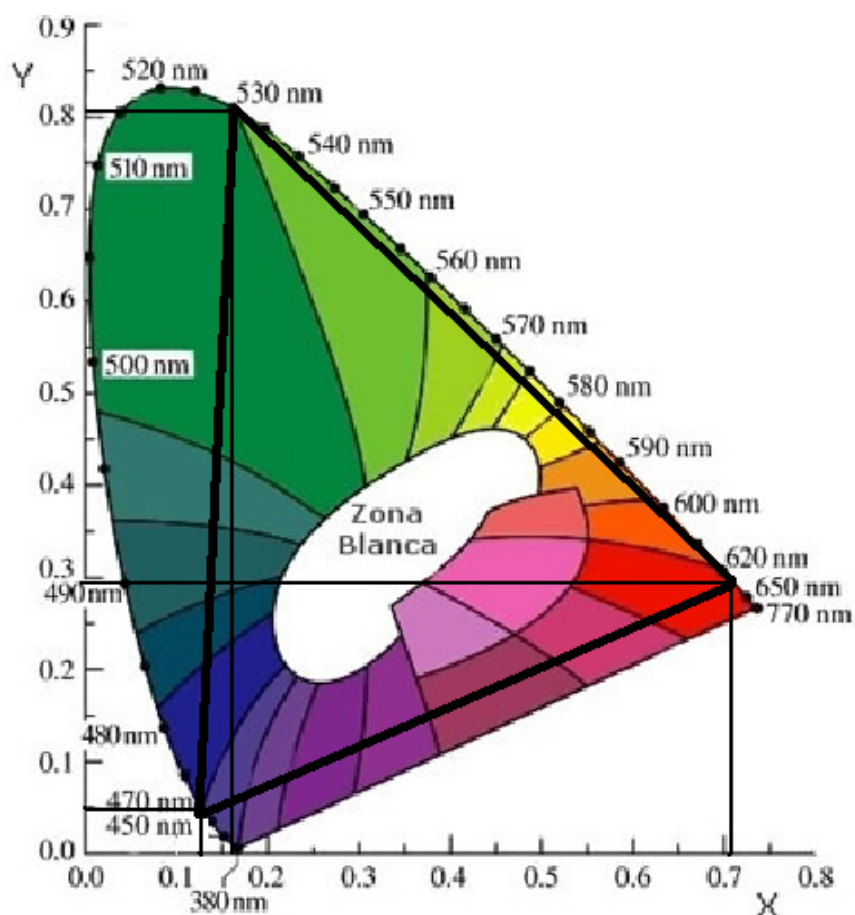


Figura 40 – Triángulo cromático formado por los LEDs de alta potencia.



Observando los resultados se puede decir que los tres LEDs se acercan a un color monocromático, es decir, a los bordes del diagrama. Además se encuentran en el área del color puro respectivamente, lo que hace que el triángulo cromático que forman estas tres fuentes abarque todos los colores cromáticos y por lo tanto, sea capaz de reproducirlos.

2. Alcance.

La distancia a la que es capaz de distinguir los colores el sistema depende de la luminosidad de los LEDs y de la luz reflejada del objeto, por lo tanto es muy relativa.

Una vez considerado que la luz que llega al objeto y al sensor es suficiente, el alcance depende únicamente de que el proceso de calibrado se haya realizado a la misma distancia. Es decir, si se quiere medir el color a una distancia en concreto se debe haber realizado la calibración del negro y el blanco a la misma distancia.

Para evitar este tipo de confusiones lo más fácil es pegar al objeto el capuchón de las fibras ópticas realizando así la medida siempre a la misma distancia.



CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

Uno de los primeros pasos del proyecto fue demostrar que el sistema era capaz de distinguir los colores, ya que para poder reproducirlos primero tiene que ser capaz de reconocerlos. No pudo asegurarse hasta que estuvo prácticamente todo el sistema montado y funcionando debido a los múltiples problemas mecánicos que se tuvo a la hora de fijar la fibra óptica. Una simple desviación de la fibra entre una medida y otra suponía un resultado erróneo, por lo que hasta que no se encontró el soporte definitivo, con el cual la fibra quedaba completamente fija pero permitía mover sin ningún problema la manguera, no se obtuvieron resultados fiables sobre las medidas.

Una vez resuelto este problema se demostró que el sistema era capaz de distinguir los colores, obteniendo diferentes niveles RGB con cada color.

El siguiente paso fue comprobar si los niveles obtenidos eran adecuados, es decir, si al trasladarlos al foco se obtendría el color de partida. Y el resultado fue positivo. Si el color se encontraba dentro de la gama de colores reproducible se obtenía en el foco el color de origen, cumpliendo así con el objetivo del proyecto.

Uno de los objetivos que no se ha llegado a alcanzar en su totalidad es el realizar un sistema lo suficientemente rápido para que su frecuencia de cuadro fuera superior a la frecuencia de integración del ojo humano. La frecuencia de refresco que se ha conseguido es la mitad que la de integración del ojo. Esta frecuencia no ha podido ser menor ya que las medidas realizadas de los niveles RGB no eran fiables y por lo tanto no se reproducían los colores. La causa puede deberse al tiempo de respuesta del sensor.

A nivel mecánico se ha conseguido que el sistema sea bastante fiable y robusto, pero podría mejorarse el sistema de sujeción de las fibras ópticas y diseñar algún soporte exclusivo para esta función. Aun así los resultados obtenidos son bastante satisfactorio, ya que reciclando materiales del laboratorio se ha conseguido fijar las fibras que era el objetivo.

El sistema es además de fácil manejo. A través de los pulsadores e interruptor se ha conseguido realizar calibraciones sin necesidad de cambiar el software del sistema, es decir, se ha conseguido una calibración dinámica. Además se puede ejecutar un modo de funcionamiento u otro solo pulsando un interruptor. Todo esto hace que el sistema sea interactivo y fácil de usar.



Uno de los inconvenientes del diseño es que es más grande de lo que en un principio se pensó. El diseño final como se ha visto son dos cajas de 250x200x65 mm. El problema es que el circuito de alimentación del foco ocupa mucho espacio, por lo que era necesario tener dos cajas.

Pero en general se puede afirmar que se han alcanzado satisfactoriamente los objetivos marcados, ya que el sistema es capaz de reproducir una amplia gama de colores.

A continuación se van a citar algunas posibles vías de trabajo futuros en relación con el proyecto.

En primer lugar se podría diseñar una lente que mezcle la luz generada por el foco. Éste está formado por dieciocho LEDs, seis de cada color, distribuidos en tres líneas. La distancia entre LEDs provoca que la mezcla de colores no sea homogénea. Si se utilizará una lente se conseguiría una mejor mezcla de los tres colores y en consecuencia, el color deseado con mayor calidad.

Otra forma de mejorar la sensibilidad del sistema y evitar el problema mecánico de fijar las fibras ópticas es diseñar otro sistema de iluminación del objeto. Una posible solución es utilizar un espejo parabólico, que focalice la luz de los LEDs en un punto del cual partiría una única fibra óptica. De esta forma se aumenta la intensidad luminosa de los LEDS amentando así la sensibilidad del sistema.

También si se realizan algunos cambios de software podría convertirse en un sistema de reconocimiento de colores. Ahora simplemente capta los niveles RGB del color pero no identifica el color. Con una tabla de valores calibrados se podría etiquetar los colores. Esto tendría múltiples aplicaciones, por ejemplo, en procesos de industriales para detectar piezas erróneas o desechar piezas de ciertos colores.

Para finalizar, otra posible aplicación es la de calibrado de tablas de colores, empleado mucho en trabajo de diseño para asegurar por ejemplo que los colores de pantalla correspondan a los de la impresora.



BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Alfonso Martín Marcos y Aurelio Labanda Alonso: “Fotometría y Colorimetría”. Escuela universitaria de Ingeniería Técnica de telecomunicaciones.
- [2] Günter Wysezecki: “Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae”.
- [3] Daniel Malacara: “Color Vision and colorimetry”.
- [4] PFC “Sistema portátil de reconocimiento de colores”. Autor: Luis Miguel Gracia Luis. Tutor: José Manuel Sánchez Pena.
- [5] <http://exp-grafica.uma.es/Profesores/www-rgs/document/luminotecnica/Fuentes.pdf>.
- [6] http://docencia.izt.uam.mx/mfg/laseres1/material_adicional/laserHeNe.pdf.
- [7] Asociación de aplicaciones de la electricidad (Madrid). “Fuentes de luz”.
- [8] Curso avanzado “Técnicas avanzadas de adquisición y transmisión de datos”.
- [9] User Manual LPC2148.
- [10] The insider’s guide to the Philips ARM7.
- [11] Apuntes de clase de microprocesadores de la ingeniería Técnica de Telecomunicaciones en Telemática.

HOJAS DE CARACTERÍSTICAS.

- LM317:
<http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/8619/NSC/LM317.html>
- TL7805:
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/28834/TI/TL780.html>
- LM324:
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/11666/ONSEMI/LM324.html>
- GT10G101:
<http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/214281/TOSHIBA/GT10G101.html>
- 2N2222:
<http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/15068/PHILIPS/2N2222A.html>



- KBPC5010:
<http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/81608/DIOTEC/KBPC5010F.html>
- LUXEON K2:
<http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS51.pdf>
- Fuente de alimentación:
<http://docseurope.electrocomponents.com/webdocs/0cdb/0900766b80cdba7f.pdf>
- UDN2981A:
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/09b6/0900766b809b6429.pdf>
- APDS-9002:
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0ad5/0900766b80ad5504.pdf>



ANEXO 1. ESTUDIO ECONÓMICO.

En el estudio económico que se presenta a continuación se resumen los costes del diseño y realización del proyecto. En él se incluyen los costes de material y personal.

Coste de material.

En la siguiente tabla se detalle los componentes utilizados en el proyecto, su precio unitario, las unidades necesarias y el precio total.

DESCRIPCION	MODELO	UNIDADES	PRECIO UNIDAD (€)	PRECIO TOTAL(€)
Regulador de tensión variable	LM317	4	0.74	2.96
Regulador de tensión de 5V	TL7805	1	1.57	1.57
Amplificador operacional	LM324	1	0.49	0.49
Transistor IGBT	GT10G101	3	3.20	9.6
Transistor IBJ	2N2222	3	0.52	1.04
Resistencias	R	24	0.05	1.20
Condensador electrolítico	C 2200uF	2	2.5	5
Fotodetector	APDS-9002	1	0.57	0.57
Driver	UDN2981A	1	3.36	3.36
Microprocesador	LPC2148	1	137.76	137.76
Placa de LEDs RGB	LUXEON-K2	1	35.53	35.53
Foco tricolor	LUXEON-K2	1	140.99	140.99
Rectificador	KBPC5010	1	4.97	4.97
Transformador toroidal	8698	1	38.90	38.90
Fuente de alimentación	GS18A	1	17.08	17.08
Cajas	-	2	10	10
Fibra óptica	Plástico	4	1.50	6
Interruptores	-	4	0.18	0.72
Conector IEC	-	1	2.66	2.66
Conector JACK	-	1	0.95	0.95
Conector delta9	-	1	2.94	2.94
			COSTE TOTAL MATERIAL	424.29 €



Coste de personal.

Para estimar los costes de personal se ha tomado como referencia los costes por hora de trabajadores adscritos a un Proyecto en la Universidad Carlos III. A continuación se muestran estos costes en función de la categoría:

Ingeniero Técnico Industrial Electrónico.....30 €/ hora
Secretario.....20€/hora

Las cargas sobre los salarios son las siguientes:

Seguridad Social.....27%
Desempleo.....1,55%
Formación Profesional.....0, 1%
Total.....28,65%

Los gastos totales de personal son los siguientes, en función del número de horas dedicadas a cada tarea:

Tarea	Número de horas	Coste/hora	TOTAL
Diseño y pruebas	500 h	38.59 €/hora	19295 €
Documentación	100 h	25.73 €/hora	2573 €
COSTE TOTAL DE PERSONAL			21868 €

Presupuesto total de ejecución.

Coste de material	424.29 €
Coste de personal	21868 €
Coste total de ejecución	22292.29 €



ANEXO 2. CÓDIGO DEL PROYECTO.

```
#include <LPC21xx.H>

void T0_RAI (void) __irq;

void T1_RAI (void) __irq;

void pwm(void);

void calibrado_negro(void);

void calibrado_blanco(void);

void demo_p(void);

void burst(void);

unsigned ciclo=0, tiempo=0, valor=0, demo=0, normal=0, n=0, calibrado=0, offset=0, i, j, a=0;

long unsigned resultado1=0, resultado2=0, resultado3=0, negro1=0, negro2=0, negro3=0, blanco1=0, blanco2=0, blanco3=0;

static unsigned medidas[90];

void main(void)    // FLUJO DE CONTROL DEL SISTEMA

{

    VPBDIV=0x00000000;  //pclk=clk/4 - 15MHz

    // INICIALIZACION PUERTOS

    PINSEL0|=0x00000000; // P0.0 --> P0.15 como GPIO

    PINSEL1|=0x04000000; // P0.29 AIN2 ( A/D)

    PINSEL0|=0x00088000; // P0.9 Y P0.7 PWM6 Y PWM2

    PINSEL1|=0x00000400; //P0.21 PWM5

    IOODIR|=0x0000001F; // P0.0 P0.1 P0.4 como salida y P0.10 P0.11 P0.20 y P0.23 como entrada

    IOOSET|=0xFFFFFFFF; // Inicializa las salidas a UNO

    //      INICIALIZACIÓN A/D
```



```
ADCR=0x00200604; // AD0.1 10 bits 3MHZ

// INICIALIZACION TIMER      0

T0TCR=0x00000002;           // reset timer

TOPR=0x00000000;           // prescaler no utilizado

T0MCR=0x00000003;           //interrupcion y reset

T0MR0=0x00003A98;           // 1 ms

VICVectAddr7=(unsigned) T0_RAI; // inicializo vector RAI

VICVectCntl7=0x00000024; // timer 0 canal 4

VICIntEnable|=0x00000010; // habilito int timer

// INICIALIZACION PWM

PWMPR=0x00000002; // preescalado

PWMPCR=0x00006400; // SINGLE EDGE y habilitadas las salidas

PWMMCR=0x00000002; //RESET

PWMMR0=4999; // PERIODO DE 1khz

// fin inicialización

while(1)
{
// LECTURA INTERRUPTORES

if((0x00000400 & IO0PIN)==0x00000400)offset=1;//P0.10 pulsador calibracion negro

if((0x00000800 & IO0PIN)==0x00000800)calibrado=1;//P0.11 pulsador calibración blanco

if((0x00800000 & IO0PIN)==0x00800000)normal=1;//P0.23 pulsador modo demo

if((0x00100000 & IO0PIN)==0x00100000)demo=1;//P0.20 interruptor modo burst

if(offset==1)calibrado_negro(); // llamada a funciones

if(calibrado==1)calibrado_blanco();

if(demo==1)demo_p();

if(normal==1)burst();
```



```
}  
  
}  
  
void TO_RAI(void) __irq           // INTERRUPCION DEL TIMER  
{  
  
    tiempo ++;           //se incrementa el tiempo  
  
    n ++;  
  
    if( calibrado==1 || offset==1 || demo==1) //modo demo y calibraciones  
    {  
  
        if(tiempo<=900)//si esta dentro del tiempo de medida  
        {  
  
            if(n==10)//           si han pasado 10 ms  
            {  
  
                ADCR|=0X01000000; // inicio conversion  
  
                while((0X7FFFFFFF|ADDR)!=0x7FFFFFFF);//esperar a que se realice la conversion  
  
                valor=ADDR;  
  
                valor= ( ( valor>>6)&0x03FF);// extraer el valor  
  
                medidas[a]= valor; // se almacena el valor de la conversión  
  
                n=0;  
  
                a ++;  
  
            }  
  
        }  
  
    }  
  
  
    if(normal==1)           // modo normal  
    {  
  
        if(tiempo<60)//si esta dentro del tiempo de media  
        {  
  
            if(n==1)  
            {
```



PFC: Camaleón, un generador adaptivo de colores mediante LEDS de alta potencia

```
        ADCR|=0X01000000; // inicio conversion

        while(!((0X7FFFFFFF|ADDR)==0x7FFFFFFF)); //esperar a que se realice la conversion

        valor=ADDR;

        valor= ( ( valor>>6)&0x03FF); // extraer el valor

        medidas[a]= valor; // se almacena el valor de la conversión

        n=0;

        a++;

    }

}

TOIR =0x00000001; // reseteo flag int

VICVectAddr=0x00000000; // fin interrupción

}

void pwm(void) // GENERAR PWM

{

    if (normal==1) //sumatorio

    {

        for(j=1;j<20;j++)

        {

            resultado1=resultado1 + medidas[j];

            resultado2=resultado2 + medidas[j+20];

            resultado3=resultado3 + medidas[j+40];

        }

    }

    if (demo==1)

    {

        for(j=1;j<30;j++)

        {

            resultado1=resultado1 + medidas[j];

            resultado2=resultado2 + medidas[j+30];

            resultado3=resultado3 + medidas[j+60];

        }

    }

}
```



```
    }  
    }  
    if (demo==1)  
    {  
        resultado1=resultado1/29; //calculo de la media  
        resultado2=resultado2/29;  
        resultado3=resultado3/29;  
  
        if ( resultado1 > negro1)resultado1=resultado1-negro1;           //correccion negro  
        else resultado1=0;  
        if ( resultado2 > negro2)resultado2=resultado2-negro2;           //correccion negro  
        else resultado2=0;  
        if ( resultado3 > negro3)resultado3=resultado3-negro3;           //correccion negro  
        else resultado3=0;  
  
        resultado1=resultado1*100/blanco1;//calculo de los porcentajes  
        resultado2=resultado2*100/blanco2;  
        resultado3=resultado3*100/blanco3;  
  
        // generar PWM  
  
        resultado1=4999*resultado1/100; //ciclo de trabajo  
        resultado2=4999*resultado2/100;  
        resultado3=4999*resultado3/100;  
  
    }  
    if(normal==1)  
    {  
        resultado1=resultado1/19; //calculo de la media  
        resultado2=resultado2/19;  
        resultado3=resultado3/19;
```




```
if ( resultado1 > negro1)resultado1=resultado1-negro1;           //correccion negro
else resultado1=0;

if ( resultado2 > negro2)resultado2=resultado2-negro2;           //correccion negro
else resultado2=0;

if ( resultado3 > negro3)resultado3=resultado3-negro3;           //correccion negro
else resultado3=0;

resultado1=resultado1*100/blanco1;//calculo de los porcentajes
resultado2=resultado2*100/blanco2;
resultado3=resultado3*100/blanco3;

// generar PWM

resultado1=4999*resultado1/100; //ciclo de trabajo
resultado2=4999*resultado2/100;
resultado3=4999*resultado3/100;
}

if (resultado1 > 4990)resultado1=4990;    //corrección posible desbordamiento
if (resultado2 > 4990)resultado2=4990;
if (resultado3 > 4990)resultado3=4990;

if (resultado1 < 400)resultado1=0;         //no se considera ningun nivel por debajo aprox.del 10%
if (resultado2 < 400)resultado2=0;
if (resultado3 < 400)resultado3=0;

if (resultado1==0 & resultado2==0 & resultado3==0) // fuera de rango parpadeo
{
while ( ciclo<3)
{
TOTCR=0x00000001; // ACTIVO timer

PWMMR2=1000;

PWMMR5=0;
```



```
PWMMR6=0;

PWMLER=0X00000065;// actualizar los MRx

PWMTCR=0X00000002; // RESETEAR

PWMTCR=0X00000005;

while (tiempo<100);           // 300 ms

PWMMR2=0;

PWMMR5=1000;

PWMMR6=0;

PWMLER=0X00000065;// actualizar los MRx

PWMTCR=0X00000002; // RESETEAR

PWMTCR=0X00000005;

while(tiempo<200);           //600ms

PWMMR2=0;

PWMMR5=0;

PWMMR6=1000;

PWMLER=0X00000065;// actualizar los MRx

PWMTCR=0X00000002; // RESETEAR

PWMTCR=0X00000005;

while(tiempo<300); //900ms


PWMMR2=0;

PWMMR5=0;

PWMMR6=0;

PWMLER=0X00000065;// actualizar los MRx

PWMTCR=0X00000002; // RESETEAR

PWMTCR=0X00000005;

tiempo=0;

n=0;

a=0;

TOTCR=0x00000002;           // reset timer

ciclo ++;

}

ciclo=0;
```



```
    }  
    else  
    {  
  
        PWMMR2=resultado1;  
  
        PWMMR5=resultado2;  
  
        PWMMR6=resultado3;  
  
        PWMLER=0X00000065;// actualizar los MRx  
  
        PWMTCCR=0X00000002; // RESETEAR  
  
        PWMTCCR=0X00000005;  
  
    }  
}  
  
}  
  
void calibrado_negro(void) //CALIBRACIÓN DEL NEGRO  
{  
  
    negro1=0; // INICIALIZACION PARA NUEVA MEDIDA DE LAS VARIABLES  
  
    negro2=0;  
  
    negro3=0;  
  
    TOTCCR=0x00000001; // ACTIVO timer  
  
    IOOPIN=0XFFFFFFFE; // P0.0 a 0 ROJO  
  
    while (tiempo<300);           // 300 ms  
  
    IOOPIN=0XFFFFFFFD; // P0.1 a 0 VERDE  
  
    while(tiempo<600);           //600ms  
  
    IOOPIN=0XFFFFFFFE; //P0.4 a 0 AZUL  
  
    while(tiempo<900); //900ms  
  
    IOOPIN=0X00000013; //apagados  
  
    while(tiempo<1500); //1.5s  
  
    IOOPIN=0X00000013; //apagados  
  
    tiempo=0;  
  
    n=0;  
  
    a=0;
```



```
TOTCR=0x00000002;          // reset timer

for(i=1;i<30;i++) //sumatorio
{
    negro1=negro1 + medidas[i];
    negro2=negro2 + medidas[i+30];
    negro3=negro3 + medidas[i+60];
}

negro1=(negro1/29); //calculo de la media
negro2=(negro2/29);
negro3=(negro3/29);
offset=0;
}

void calibrado_blanco(void)//CALIBRACIÓN DEL BLANCO
{

    blanco1=0;// INICIALIZACION PARA NUEVA MEDIDA DE LAS VARIABLES
    blanco2=0;
    blanco3=0;

    TOTCR=0x00000001; // ACTIVO timer

    IOOPIN=0xFFFFFFFF; // P0.0 a 0 ROJO
    while (tiempo<300);          // 300 ms

    IOOPIN=0xFFFFFFFFD; // P0.1 a 0 VERDE
    while(tiempo<600);          //600ms

    IOOPIN=0xFFFFFEEF; //P0.4 a 0 AZUL
    while(tiempo<900); //900ms

    IOOPIN=0X00000013; //apagados
    while(tiempo<500); //1.5s

    IOOPIN=0X00000013; //apagados
```



```
        tiempo=0;

        n=0;

        a=0;

    TOTCR=0x00000002;          // reset timer

    for(i=1;i<30;i++) //sumatorio

    {

        blanco1=blanco1 + medidas[i];

        blanco2=blanco2 + medidas[i+30];

        blanco3=blanco3 + medidas[i+60];

    }

    blanco1=(blanco1/29); //calculo de la media

    blanco2=(blanco2/29);

    blanco3=(blanco3/29);

    calibrado=0;

}

// MEDIDA DEL COLOR

void demo_p(void) // MODO DEMO

{

    // INICIALIZACION PARA NUEVA MEDIDA DE LAS VARIABLES

    resultado1=0;

    resultado2=0;

    resultado3=0;

    TOTCR=0x00000001; // ACTIVO timer

    IOOPIN=0xFFFFFFF; // P0.0 a 0 ROJO

    while (tiempo<300);          // 100 ms

    IOOPIN=0xFFFFFFF; // P0.1 a 0 VERDE

    while(tiempo<600);          //200ms
```



```
IOOPIN=0XFFFFFFEF; //P0.4 a 0 AZUL

while(tiempo<900); //300ms

IOOPIN=0X00000013; //apagados

while(tiempo<1500); //1s


tiempo=0;

a=0;

n=0;


TOTCR=0x00000002; // reset timer

pwm();

demo=0;

}


void burst(void) // MODO BURST

{

    for (i=0;i<90;i++)//inicialización

    {

        medidas[i]=0;

    }

    TOTCR=0x00000001; // ACTIVO timer

    IOOPIN=0XFFFFFFFE; // P0.0 a 0 ROJO

    while (tiempo<20); // 20 ms

    IOOPIN=0XFFFFFFFD; // P0.1 a 0 VERDE


    while(tiempo<40); //40 ms

    IOOPIN=0XFFFFFFEF; //P0.4 a 0 AZUL


    while(tiempo<60); //60 ms

    IOOPIN=0X00000013; //apagados

    while(tiempo<80); //80ms

    resultado1=0;
```



```
        resultado2=0;

        resultado3=0;

        pwm();

        TOTCR=0x00000002;           // reset timer

        normal=0;

        n=0;

        a=0;

    }
```

ANEXO 3. ESQUEMA ELÉCTRICO DEL PROYECTO.

